

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

Emma Pasanen

TAHTIGENERAATTORIN

JÄNNITTEENSÄÄTÖJÄRJESTELMIEN VERTAILU

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 16.2.1996.

Työn valvoja



Tapani Jokinen

Työn ohjaaja



Ritva Hirvonen

19930

TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

Tekijä: Emma Pasanen

Työn nimi: Tahtigeneraattorin jännitteensäätöjärjestelmien vertailu

Päivämäärä: 16.2.1996

Sivumäärä: 59

Osasto: Sähkötekniikan osasto

Professori: S-17 Sähkömekaniikka

Työn valvoja: Professori Tapani Jokinen

Työn ohjaaja: Tekniikan tohtori Ritva Hirvonen

Diplomityössä tutkitaan erilaisia tahtigeneraattoreiden magnetointijärjestelmiä: tasasähkömagnetointia, staattista magnetointia ja harjatonta magnetointia. Magnetointijärjestelmiä vertaillaan keskenään jännitteensäädön nopeuden, taajuusvasteen sekä kantaverkon muutosilmiöihin vaikuttamisen kannalta. Vertailuun ja simulointiin käytetään verkostolaskentaohjelmistoa.

Jännitteensäädön nopeutta tutkitaan kantaverkon generaattoreille tehtävästä askelvastekokeesta. Askelvastekäyristä nähdään generaattorin liitinjännitteen nousuaika ja mahdollinen ylitys, kun magnetointijännitteen säätäjän asetteluarvoja muutetaan askelmaisesti 10 %. Lasketuista avoimen piirin vahvistus- ja vaihekäyristä nähdään säätäjän toiminta verkon normaalilla heilahtelutaajuudella 0,1 - 3 Hz. Kantaverkon muutosilmiöissä tutkitaan jännitteensäätäjän nopeuden ja rajoittimien vaikutusta yhden suuritehoisen generaattorin lähiviassa sekä koko kantaverkon generaattoreiden jännitteensäätäjien nopeuden ja rajoittimien vaikutusta verkon tehonsiirtokykyyn mitoittavassa vikatilanteessa. Magnetointijärjestelmät kuvataan samalla laskentaohjelmiston mallilla. Mallin parametriarvoja muuttamalla säätäjille saadaan haluttu nopeus.

Tuloksista havaitaan, että nopealla staattisella magnetoinnilla (nousuaika 0,3 s) ilman magnetointijännitteen rajoittimia saavutetaan parempi stabiilisuus koneen lähiviassa ja että hitaammalla tasasähkö- tai harjattomalla magnetoinnilla (nousuaika vähintään 0,8 s) ja pienillä rajoittimien arvoilla saavutetaan parempi stabiilisuus kantaverkon siirtokyvyssä. Lähiviassa erittäin nopean säätäjän aiheuttama negatiivinen vaimentava momentti huonontaa stabiilisuutta. Mitoittavassa viassa kaikkien koneiden erittäin hidas säätö (nousuaika useita sekunteja) tai säätäjien poistaminen kokonaan huonontavat verkon dynaamista stabiilisuutta. Siirtokyvyn kannalta on siis löydettävissä optimiarvo säätäjien nopeudelle.

Avainsanat: tahtigeneraattori, magnetointi, jännitteensäätö, stabiilisuus

Author: Emma Pasanen

Name of the thesis: Comparison of voltage regulation systems of synchronous generators

Date: 16.2.1996

Number of pages: 59

Faculty: Faculty of electrical engineering

Professorship: S-17 Electromechanics

Supervisor: Professor Tapani Jokinen

Instructor: Doctor of technology Ritva Hirvonen

The aim of this thesis is to study different excitation systems of synchronous generators: DC excitation, static excitation and brushless excitation. Excitation systems are compared to each other by their voltage regulation speed, transfer function and their effect in transient phenomena in a network. Comparison and simulations are made with a power system simulation program.

Voltage regulation speed is studied by performing an open circuit step response test for all generators in the network. The rise time of generator terminal voltage and the possible overshoot are defined by open circuit step response curves, when a step change of 10 % is applied to the reference voltage. Regulator's operation on the normal oscillation frequency 0,1 - 3 Hz of the network is seen from calculated gain- and phase curves. In network transient phenomena, two different cases are studied: the effect of speed and limiters of a voltage regulator in a three-phase fault on a major transmission line near the power plant, and the effect of speed and limiters of voltage regulators of all generators of the network on the power transmission capability of the network in a dimensioning fault situation. Excitation systems are represented by one model in the simulation program, and regulators will obtain the acceptable speed by changing the parameters of the model.

From the results we can see that better stability is achieved in one plant fault by using fast static excitation (rise time 0,3 s) without excitation voltage limiters. Also, better stability is achieved in the network transmission capability by using slower brushless or DC excitation (rise time at least 0,8 s) with small limiter values. In the nearby fault, negative damping torque caused by fast regulator reduces stability. Very slow regulation of all plants (rise time many seconds), or the removing of all regulators reduces network's dynamic stability in a dimensioning network disturbance. So, for transmission capability, it is possible to find an optimum rise time for the regulators.

Keywords: synchronous generator, excitation, voltage regulation, stability

ALKULAUSE

Diplomityö on tehty IVO Voimansiirto OY:ssä (IVS) opinnäytteeksi Teknillisen korkeakoulun Sähkötekniikan osastolle. Työn valvojana oli professori Tapani Jokinen, jota kiitän innostavuudesta ja hyvistä neuvoista.

Työn ohjaaja oli tekniikan tohtori Ritva Hirvonen, jota kiitän kärsivällisyydestä ja huolenpidosta sekä kannustamisesta työn loppuun saattamisessa.

Työtovereitani kiitän leppoisan työskentelyilmapiirin luomisesta ja kaikista tietotekniikan käyttöön liittyvistä neuvoista.

Isääni, edesmennyt äitiäni ja sulhastani Timiä kiitän henkisestä tuesta jokaisessa työni vaiheessa.

Helsingissä 16.2.1996



Emma Pasanen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKULAUSE.....	I
SISÄLLYSLUETTELO.....	II
KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	IV
1 JOHDANTO.....	1
1.1 Työn tausta	1
1.2 Työn tavoite	1
1.3 Työn rakenne	2
2 VOIMAJÄRJESTELMÄ.....	3
2.1 Tuotanto.....	3
2.2 Nordel.....	4
2.2.1 Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko	4
2.2.2 Mitoitussäännöt.....	5
2.2.3 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset.....	8
2.3 Jännitteensäätö	10
2.3.1 Magnetointijärjestelmän osat	11
2.3.2 Säättäjä	12
2.3.3 Magnetointijärjestelmien kehitys	13
3 GENERAATTORIT	14
3.1 Tahtigeneraattorin rakenne	14
3.2 Generaattorin mallinnus.....	15
4 MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄT	20
4.1 Tasasähkömagnetointilaitteisto	20
4.2 Vaihtosähkömagnetointilaitteisto.....	20
4.2.1 Staattinen magnetointi.....	21
4.2.2 Harjaton magnetointi.....	23
4.3 Magnetointijärjestelmän mallinnus	24
4.3.1 Komponenttien mallinnus.....	25
4.4 Rajoittimet	26
4.4.1 Rajoittimien mallinnus.....	28
4.5 Lisästabilointi.....	30

4.5.1 Lisästabiloinnin mallinnus	30
4.6 Magnetointijärjestelmän ominaisuuksia.....	31
4.6.1 Kattojännite	31
4.6.2 Vaste	32
4.6.3 Itsemagnetointi.....	35
5 VOIMAJÄRJESTELMÄN LASKENTAMALLI.....	37
5.1 Järjestelmän mallinnus.....	37
5.2 Ohjelma.....	38
5.3 Generaattorimallit	39
5.3.1 Generaattorisolmun malli	39
5.3.2 Mallityypit	40
5.3.3 Kyllästyminen.....	40
5.3.4 Vaimennus.....	41
5.4 Magnetointijärjestelmämallit.....	42
5.4.1 Tasasähkömallit.....	42
5.4.2 Vaihtosähkömallit	42
5.4.3 Jännitteensäätäjät	44
5.5 Laskennan kulku	45
6 LASKELMAT	46
6.1 Yhden koneen vian vaikutus	47
6.2 Kaikkien koneiden säätäjien vaikutus	50
6.2.1 Tuonti Ruotsista ja siirto pohjoisesta etelään	52
6.2.2 Vienti Ruotsiin ja siirto etelästä pohjoiseen	53
7 TULOKSET	54
7.1 Yhden koneen vian vaikutus	54
7.2 Siirtokyky	54
7.2.1 Tuonti Ruotsista ja siirto pohjoisesta etelään	54
7.2.2 Vienti Ruotsiin ja siirto etelästä pohjoiseen	55
7.3 Johtopäätöksiä	55
8 YHTEENVETO	57
LÄHDEVIITTEET.....	58
LIIITTEET.....	59

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Symbolit

A_{EX}, B_{EX}	kyllästymiskertoimia
D	vaimennusvakio
d	d- akseli, pitkittäisakseli
D_t	turpiinin mekaaninen vaimennus
e	sähkömotorinen voima, hetkellisarvo
E, E_q	sähkömotorinen voima, tehollisarvo
$\underline{E}, \underline{E}_q$	sähkömotorinen voima, vektori
f	taajuus
$G(s)$	siirtofunktio
H	hitausvakio
$H(s)$	säätöfunktio
I	virta, tehollisarvo
i	virta, hetkellisarvo
I_f	magnetointivirta
I_N	nimellisvirta
J	hitausmomentti
j	imaginaariyksikkö
K	vahvistus
$K_1 \dots K_6$	lohkokaavioesityskertoimia
K_C	kommutointivakio
K_D	demagnetoitumisvahvistus
K_D	vaimennuskerroin
K_E	magn. järjestelmän vahvistus
K_m	vahvistusvara
K_p	vahvistuksen huippuarvo
L	induktanssi
L''	alkuinduktanssi
$L(s)$	operaattori-induktanssi
L_{adu}	ilmavälisuoran kulmakerroin
L_{fd}	magnetointi-induktanssi
$L_{k\sigma}$	hajainduktanssi
L_{md}	keskinäisinduktanssi
L_x, L_z	rajoittimet sivuilla 28-30
n	roottorin nopeuspoikkeama, suhteellisarvo
P	pätöteho
p	napapariluku
P_e, P_s	sähköteho
P_m	mekaaninen teho
Q	loisteho
q	q-akseli, poikittäisakseli
R	resistanssi
R_a	staattoriresistanssi

S	näennäisteho
s	Laplace-muuttuja
S_E, V_E	kyllästymissuureita
T	aikavakio
T	momentti
t	aika
T_A, T_B, T_E	säätäjän aikavakioita
T_e	sähköinen momentti
T_m	mekaaninen momentti
T_R	mittauksen aikavakio
T_w	suodattimen aikavakio
U	jännite, tehollisarvo
u	jännite, hetkellisarvo
U_E	tasasuuntaajan syöttöjännite
U_f	magnetointijännite
U_i	jännitteensäätäjän sisäänmenojännite
U_{MAX}, U_{MIN}	magnetointijännitteen rajoittimet
U_{olo}	jännitteen oloarvo
U_R	jännitteensäätäjän ulostulo
U_{ref}	jännitteen ohjearvo
U_t	liitinjännite
V_x	kyllästysfunktio
W	energia
X	reaktanssi
X'	muutosreaktanssi
X''	alkureaktanssi
X_c	järjestelmän kapasitanssi
Z	impedanssi
$\cos\varphi$	tehokerroin
δ	napakulma, tehokulma
Δf	taajuuspoikkeama
$\Delta\omega$	kulmanopeuspoikkeama
ϕ	vaihekulma
ϕ_m	vaihevara
θ	staattorin ja roottorin välinen kulma
σ	hajavuoindeksi
ω	kulmataajuus
ω_B	taajuuskaistan leveys
ω_c	crossover -kulmataajuus
Ω_m	mekaaninen kulmanopeus
ω_o	nimelliskulmataajuus
ω_p	kulmataajuuden huippuarvo
Ψ	magneettivuo
Ψ''	alkutilan magneettivuo

Alaindeksit

D	D -käämitys
d	d -akseli
e	sähköinen
f, fd	f -käämitys, magnetointikäämitys
m	mekaaninen
PSS, STAB	lisästabilointi
Q	Q -käämitys
q	q -akseli
r	roottori
s	staattori

Lyhenteet

GENCLS	epätarkka generaattorimalli PSS/E:ssä
GENDCO	umpinapainen generaattorimalli PSS/E:ssä
GENROE	umpinapainen generaattorimalli PSS/E:ssä
GENROU	umpinapainen generaattorimalli PSS/E:ssä
GENSAE	avonapainen generaattorimalli PSS/E:ssä
GENSAL	avonapainen generaattorimalli PSS/E:ssä
GENTAP	konemuuntajan muuntosuhde PSS/E:ssä
GENTRA	epätarkka generaattorimalli PSS/E:ssä
IEEE	sähkötekniikan kansainvälinen järjestö
IEEET1...4	magnetointijärjestelmämalli PSS/E:ssä
ISORCE	lähdevirta PSS/E:ssä
IVOEX	magnetointijärjestelmämalli PSS/E:ssä
IVOST	lisästabilointimalli PSS/E:ssä
PSS/E	Power system simulator / Engineering -ohjelmisto
SCRX	magnetointijärjestelmämalli PSS/E:ssä
SEXS	magnetointijärjestelmämalli PSS/E:ssä
ZSORCE	lähdeimpedanssi PSS/E:ssä
ZTRAN	konemuuntajan impedanssi PSS/E:ssä

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Generaattorin jännitteensäätäjän avulla pidetään yllä sähköverkon jännitetasoa, joka laskee ja nousee tehon kulutuksen ja siirron vaihteluiden myötä. Ylivoimaisesti suurin osa voimajärjestelmän tuotantoyksiköiden koneista on tahtigeneraattoreita. Vain jotkut pienet generaattorit, joilla ei voimantuotannon kannalta ole keskeistä merkitystä, ovat epätahtikoneita. Voimajärjestelmässä kaikilla tahtigeneraattoreilla on keskenään sama taajuus ja sähkökulmanopeus, vaikka koneiden roottorit pyörivätkin eri nopeuksilla napapari-luvuistaan riippuen. Samassa tahdissa käyminen onnistuu ns. tahdistavan momentin ansiosta.

Tahtigeneraattorin jännitteensäätö tarkoittaa roottoriin vietävän magnetointitehon säätöä. Magnetointijärjestelmä reagoi ominaisuuksistaan ja säätämänsä koneen ominaisuuksista riippuen eri nopeudella saamaansa virta- tai jänniteohjeeseen. Generaattorin liitinjännite seuraa säätäjän ohjaamaa ja rajoittamaa magnetointijännitettä ja asettuu säätäjän määräämään arvoon säätäjän määräämällä nopeudella.

Verkkoon syötetyn tehon suuruutta säädetään muuttamalla generaattoria pyörittävän voimakoneen tehoa, ja generaattoreiden loistehotuotantoa ohjataan tahtikoneen magnetointivirtaa säätämällä. Pätötehotasapainon häiriintyessä esim. kuormitusmuutosten vuoksi kompensoi häiriötä aluksi pyörivien koneiden huimamassojen liike-energia. Liike-energian muutos eli pätötehon epätasapaino näkyy suurvoimansiirrosta verkon taajuudessa ja loistehon epätasapaino vaikuttaa verkon jännitteeseen.

Verkon tehonsiirtokyky on määritetty pahimpien vikatilanteiden mukaan sellaiseksi, että vian jälkitilassa verkon toiminta säilyy stabiilina. Stabiilisuuden menetyksen seurauksena generaattoreiden napakulmat suurenevät kiihtyen, siirtoverkon johtotehot heilahtelevat vaimentumatta ja jännitteet laskevat alle sallittujen rajojen.

1.2 Työn tavoite

Tavoitteena työssä on vertailla erityyppisiä generaattoreiden magnetointijärjestelmiä ja niiden jännitteensäätöominaisuuksien vaikutusta. Vanhemmissa koneissa käytettiin tasasähköherätinkonemagnetointia ja uudemmissa koneissa käytetään tasasuunnattavaa vaihtosähkömagnetointia. Vertailu on tehty PTI:n PSS/E -verkostolaskentaohjelmalla

simuloimalla mallinnettuja, Suomessa käytettyjä magnetointijärjestelmiä. Vertailukriteereinä käytetään säätäjien askelvastetta, vahvistus- ja vaihekäyriä, vaikutusta yhden koneen stabiilisuuteen verkkoon nähden sekä vaikutusta kantaverkon siirtokykyyn.

1.3 Työn rakenne

Työssä kerrotaan aluksi Suomen voimansiirtojärjestelmästä ja sen mitoittamisesta. Seuraavaksi perehdytään sähkön tuotantoyksikön eli tahtigeneraattorin ja sen magnetointijärjestelmän rakenteeseen ja mallintamiseen. Jännitteensäädön vertailukriteerien teoriaa esitetään myös. Laskentaohjelmiston avulla simuloidaan yhden koneen vikaa normaalissa käyttötilanteessa sekä mitoittavia vikatilanteita tehonsiirto-rajoiden äärikohdissa, joissa siirto olemassaolevilla laitteistoilla muuttuu epästabiiliksi. Generaattoreiden tuotantoon vaikutetaan muuttamalla säätäjiä nopeammiksi tai hitaammiksi, jolloin verkon stabiilisuus lähiviassa tai siirtokyky mitoittavassa viassa selvästi paranee tai huononee. Tehtyjen laskelmien tulokset ja niistä muodostunut teoria esitetään lopuksi. Dynamiikkalaskelmien kuvat ovat liitteenä.

2 VOIMAJÄRJESTELMÄ

Voimansiirtojärjestelmän tehtävänä on sähkön siirto tuotantoyksiköistä kuluttajille. Suomen voimansiirtojärjestelmän runkona on ns. kantaverkko, joka koostuu 400 kV, 220 kV ja osin 110 kV johdoista sekä niihin liittyvistä sähköasemista. Alueverkot koostuvat yhtä kuluttajaa palvelevista 110 kV johdoista, ja jakeluverkon muodostavat pääosin 20 kV keskijänniteverkko ja 400/230 V pienjänniteverkko. Suomen voimajärjestelmässä kaikki kuluttajat ja voimalaitokset on kytketty yhteiseen vaihtosähköverkkoon. Suurjännitejohdot on rakennettu silmukkaverkoksi, jolloin syöttöasemat voivat saada sähköä useampaa reittiä ja verkon käyttövarmuus paranee. Mitä suurempaa tehoa siirretään sitä suurempaa jännitettä on käytettävä. Siirtoetäisyydet voivat olla pitkiä, koska vahvaan kantaverkkoon on taloudellisesti pystytty rakentamaan vähän mutta suuria tuotantoyksiköitä. Maaseudun pienjänniteverkot on kustannussyistä rakennettu säteittäisiksi /2/.

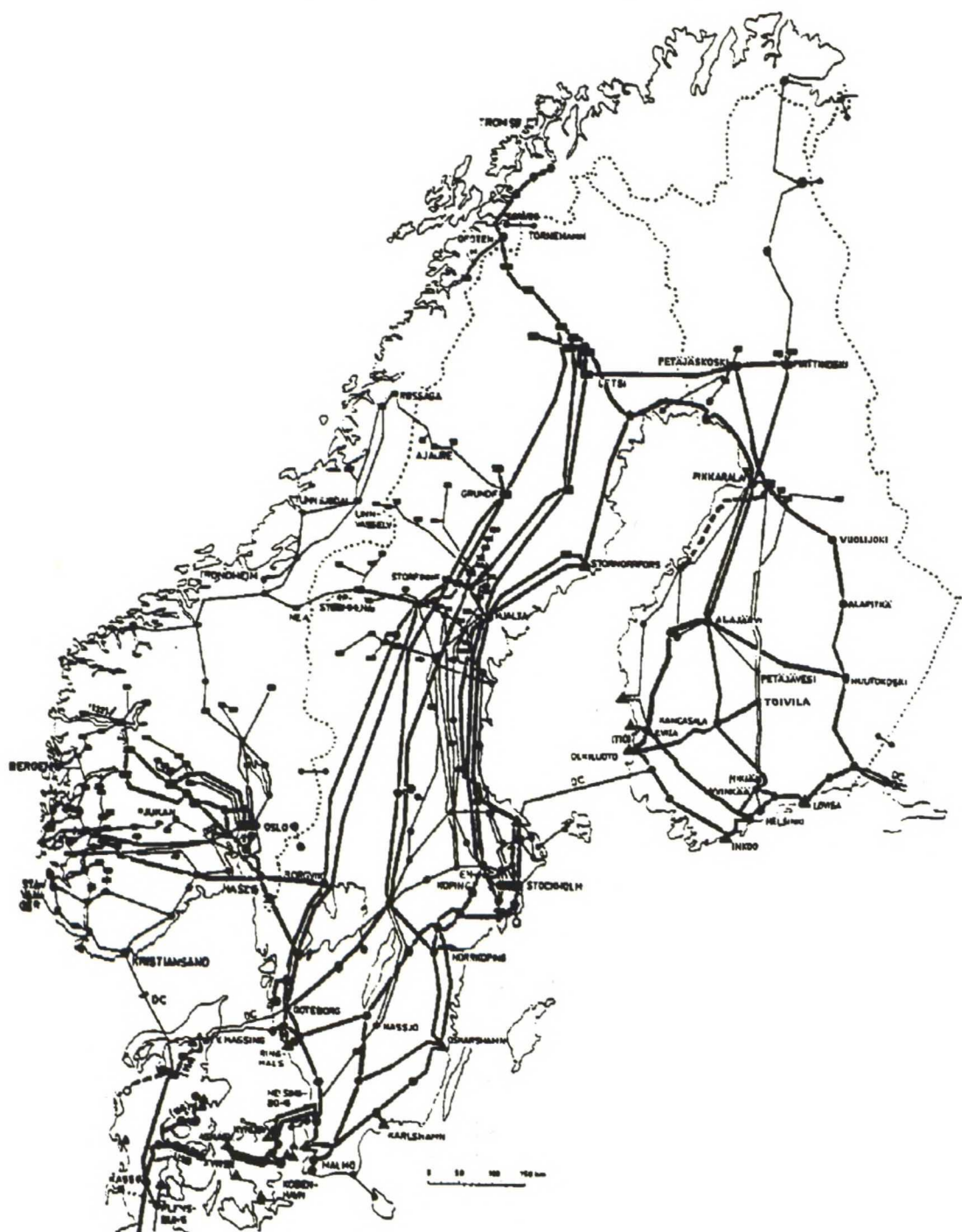
2.1 Tuotanto

Suomessa tuotetusta sähköenergiasta 80 % tuotetaan lämpövoimalla ja 20 % vesivoimalla. Suuret ydinvoimalaitokset toimivat jatkuvasti lähes täydellä teholla ja niillä ajetaan peruskuormaa. Lauhdevoimalan hyötysuhde on kulutetun polttoaineen kemiallisen energian suhteen huono. Noin 60 % lämmöstä menee lauhdevesien ja savukaasujen myötä hukkaan, jos niitä ei pystytä käyttämään muuhun lämmitykseen. Hukkalämmön hyötykäyttö on rannikolla olevissa ydinvoimaloissa vaikeaa pitkien siirtoetäisyyksien takia. Kaasuturpiinilaitokset on tarkoitettu vara- ja huippuvoiman tuotantoon. Ne pystytään käynnistämään ja tahdistamaan verkkoon nopeasti, mutta niillä on huono hyötysuhde, mikäli pakokaasuja ei voida kierrättää. Lisäksi niiden käyttökustannukset ovat suuret. Vastapainelaitos ja kombivoimalaitos ovat hyötysuhteeltaan parempia, koska niissä pystytään käyttämään uudelleen hukkakaasuja ja lämpöä. Vesivoiman käyttöön vaikuttavat suuret vuotuiset virtaamien vaihtelut. Vettä pystytään tosin varastoimaan säännöstelyaltaisiin ja sen virtaaman ohjaamisella voidaan parhaiten huolehtia verkon tehonsäädöstä eli tuotannon tasapainosta kulutuksen kanssa. Suomen vuosittainen energiankulutus on n. 68 TWh ja tehon tuotantokapasiteetti on n. 14,5 GW. Kulutetusta sähköenergiasta 9% tuodaan Ruotsista, Venäjältä ja Norjasta.

2.2 Nordel

2.2.1 Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko

Suomen kantaverkko on osa pohjoismaista yhteiskäyttöverkkoa, kuva 2.1.



Kuva 2.1 Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko, paksulla viivalla 400 kV ja ohuella 220...350 kV johdot.

Synkronoituun pohjoismaiseen voimajärjestelmään kuuluvat lisäksi Ruotsi, Norja ja Tanskasta Själlanti. Suomen ja Ruotsin välillä ovat 400 kV johdot Petäjäskoski-Letsi ja

Keminmaa-Svartbyn, 220 kV johto Ossauskoski-Kalix sekä 400 kV ”Fenno-Skan” - tasasähkömerikaapeli Rauma-Dannebo. Suomi on yhteydessä Norjan sähköverkkoon 220 kV johdolla Vajukoski-Varangerbotn. Pohjoismaisesta yhteiskäyttöverkosta on vaihtosähköyhteys Etelä-Ruotsista sekä Tanskasta Jyllannista ja Själlannista manner-Euroopan voimajärjestelmään ja tasasähköyhteys johtojen Ylikkälä-Viipuri kautta Venäjän voimajärjestelmään. Suomessa ja Ruotsissa sähköä tuotetaan vesi- ja lämpövoimalla, Tanskassa yksinomaan lämpövoimalla ja Norjassa pelkästään vesivoimalla. Pohjoismaiden voimantuotantorakenteen erot ovat hyvä perusta yhteiskäytölle. Vuosittainen energiankulutus Nordelissa on n. 360 TWh ja tehon tuotantokapasiteetti on n. 88 GW.

Nordel on tärkeimpien pohjoismaisten voimantuottajien muodostama neuvoa-antava elin, joka perustettiin vuonna 1963. Siihen kuuluu myös Islanti, vaikkei sinne olekaan sähköistä yhteyttä. Nordelin komiteoiden työn tulokset näkyvät pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon yleisissä mitoitussäännöissä, voimalaitosten käyttöteknisissä suosituksissa sekä tehon ja taajuuden säätöä koskevissa suosituksissa. Verkon taloudellinen mitoittaminen siirtotarpeiden mukaan ja yleisimpiin vikatapauksiin varautuminen siten, että kuluttajille ei aiheuteta sähköntoimituskeskeytyksiä, ovat verkon suunnittelun lähtökohdat Nordelissa.

2.2.2 Mitoitussäännöt

Nordelin mitoitussäännöt pohjoismaisen siirtoverkon suunnitteluun ovat vuodelta 1992 /11/. Ne on tarkoitettu ensisijaisesti niiden verkon osien mitoittamiseen, joilla on merkitystä yhteiskäytön kannalta. Mitoitussääntöjen perustana on valmistautuminen ennakolta yksittäisiin, verkossa aikaisemminkin esiintyneisiin vikoihin, koska kahden yhtäaikaisen, toisistaan riippumattoman vian syntyminen on epätodennäköistä. Nämä yksittäiset viat eivät saa johtaa laajenevaan vikaan. Verkossa ei saa normaalitilanteessa esiintyä sähkömekaanisia heilahteluja, ja vikatilanteen jälkeisten heilahtelujen on vaimennuttava nopeasti. Mitoitussääntöjen avulla voidaan investoinnit, häviöt ja keskeytyskustannukset arvioida pohjoismaisessa pääsiirtoverkossa.

Kriteereissä asetetaan vaatimukset sallituille seurauksille eri käyttötilanteiden ja vikatyypin yhdistelmillä. Periaatteessa hyväksytään vakavammat seuraukset harvinaisemmille vikojen ja käyttötilanteiden yhdistelmille sekä tiettyjen epätavallisten

vikojen aiheuttamat alueelliset häiriöt, jollei muiden osajärjestelmien käyttövarmuutta vaaranneta.

Säännöillä määritellään sellainen verkon siirtokyky, että vaadittava käyttövarmuus ehjällä verkolla voidaan säilyttää vaihtelevissa tuotanto- ja kulutustilanteissa.

Verkon suunnittelussa käytetään kiinteitä kriteereitä, eli on määritelty joukko vikatapauksia, joilla verkkoa tulee tarkastella. Jokaiselle vikatapaukselle määritellään kuvan 2.2 mukaisesti vikaa edeltävä käyttötilanne (ehjä verkko, suunniteltu keskeytys tai suunnittelematon keskeytys) ja seuraukset, jotka voidaan hyväksyä. Vikatapaukset, joiden varalta verkkoa tulee tarkastella, on jaettu viiteen kuvassa näkyvään ryhmään. Viat ryhmissä FG1 ja FG2 ovat yleisimpiä. Vikojen seurauksille on määritelty kolme tasoa A, B ja C, joilla on ensisijaisesti merkitystä pohjoismaisen yhteiskäyttöjärjestelmän kannalta:

A) Stabiili käyttö, vain paikallisia seurauksia hyväksytään. Voimajärjestelmän tulee säilyä kaikin puolin stabiilina ja yhteiskäytön edellytetään säilyvän myös vian jälkeen. Verkon jännitteiden ja taajuuden tulee vian jälkeen olla kuluttajien ja voimalaitosten kannalta hyväksyttävät.

B) Hallittu käyttö, seuraukset kyetään rajaamaan ja hallittu tuotannon ja kuormien eroonkytkentä sallitaan. Myös osaverkon romahdus ja verkon jakautuminen hyväksytään, jos ne voidaan rajoittaa häiriölliseen osa-alueeseen. Harvinaisissa tapauksissa voidaan sallia suurempia maankattavia häiriöitä, jos ne eivät leviä yhteiskäyttöyhteyksien kautta maasta toiseen.

C) Epästabiili tila ja verkon romahdus, stabiilisuuden menetys hyväksytään. Verkko voi jakautua ja laaja verkko voi romahtaa pohjoismaisessa voimajärjestelmässä, jolloin tavoitteena on luoda edellytykset verkon jälleenkokoamiselle. Normaalitilaan palaamiseksi edellytetään olevan riittävät käyttötekniset mahdollisuudet.

Käyttötilanne ennen vikaa

		Ehjä verkko		Verkossa keskeytys			
		Ei merkittävien komponenttien keskeytyksiä DT0	Suunniteltu huolto	Äkillinen vika, käyttö mukautunut 1)		Useampi kuin yksi komponentti poissa käytöstä tai käyttö ei ole mukautunut (alle 15 min viasta)	
			Rinnakkais- tai sarjakomponentti poissa käytöstä DT1	Rinnakkaiskomponentti poissa käytöstä DT2	Sarjakomponentti poissa käytöstä DT3		
V i k a t a p a u s	Tavalliset viat	Yksittäinen vika joka ei koske sarjakomponenttia FG1	A	A	A	A	Näitä käyttötilanteita ei normaalisti tarkastella suunnittelussa Seurauksia pienennetään mikäli se on kohtuullisin toimenpitein mahdollista
		Yksittäinen, sarjakomponenttia koskeva vika FG2				A/B	
		Epätavallinen yksittäisvika ja erityiset kahden vian yhdistelmät FG3				B	
	Äärimmäiset viat	Muut yhteisestä syystä aiheutuneet kahden vian yhdistelmät FG4	B	B	B	C	
		Muut moniviat FG5	C	C	C		

Selityksiä käyttötilanteille

Rinnakkaiskomponentilla tarkoitetaan komponenttia, joka sisältyy vikaryhmään FG1 (generaattori, kondensaattori/reaktori).

Sarjakomponentilla tarkoitetaan komponenttia, joka sisältyy vikaryhmään FG2 (johto, kokoojakisko jne.)

1) Käyttötilanne on sopeutettu 15 minuutissa vian jälkeen käytettävissä olevin keinoin (häiriöreservit jne.)

Seuraukset vian jälkeen

- A Stabiili käyttö, paikallisia seurauksia sekä verkkosuojan rajattu toiminta
- B Hallittu käyttö, alueellisia seurauksia
- A/B Tason B mukaiset seuraukset, jos vika sattuu jo aiemmin heikentyneessä verkon osassa, muissa osissa sallitaan tason A mukaiset seuraukset
- C Stabiiliisuuden menetys ja verkon romahdus

Kuva 2.2 Mitoituskriteerikaavio.

Vikaryhmät

FG1, pysyvä rinnakkaiskomponentin (voimalaitos, kulutus, kondensaattorit, reaktorit) poislaukeaminen siihen liittyvine muuntoineen.

FG2, pysyvä sarjakomponentin (sarjakondensaattori, johto, verkkomuuntaja, kokoojakisko, tasavirtayhteys) poislaukeaminen ilman vikaa tai edeltävän pysyvän 1-vaiheisen vian seurauksena.

FG3, kaksi- tai kolmivaiheisen vian jälkeinen pysyvä poislaukeaminen johdossa (ilman pikajälleenkytkentää), kokoojakiskossa maiden välisten yhdysjohtojen pääteasemilla tai vikayhdistelmä laitteistoissa, joiden luotettavuutta ei tunneta.

FG4, kolmivaiheisen vian jälkeinen pysyvä poislaukeaminen johtovian ja lämpövoimalaitoksen verkosta eroamisen yhdistelmissä, kaksoisjohdossa, kahdessa voimalaitos-

yksikössä, jakokatkaisijalla varustetussa kytkinlaitoksessa, bipolaarisessa tasavirta-yhteydessä tai kahdessa samalla johtokadulla olevassa johdossa sekä katkaisijan toimimattomuus tai relevika vian poiskytkennässä.

FG5, kaksi riippumatonta samanaikaista vikaa tai kolme tai useita samanaikaisia vikoja.

Käytännössä vioista vain muutama on mitoittava kussakin yksittäisessä verkko-osassa.

2.2.3 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Voimalaitoskoneistoilla edellytetään olevan tiettyjä käyttötekniisiä ominaisuuksia, joilla varmistetaan yksittäisten koneiden toiminta yhteismitallisesti koko järjestelmässä /6/.

Koneistoilla tulee olla sellainen jännite- ja taajuusvaihteluiden kestävyys, että ne selviävät tavallisimmista verkkovioista ilman eroonkytkeytymistä tai vaurioitumista sekä sellainen säätökyky, että ne kykenevät tukemaan verkkoa pätöteho- ja loisteho-häiriöreserveinä.

Vaatimukset koskevat voimajärjestelmään liitettäviä uusia yli 50 MW voimalaitoksia sekä perusparannusten yhteydessä uusittavia järjestelmäteknisiä ominaisuuksia kuten säätölaitteita. Vaatimukset jaotellaan käyttötekniisiin ominaisuuksiin, tehonsäätölaitteiden ominaisuuksiin, tehon muutosominaisuuksiin verkon normaalissa käyttötilassa tai häiriöiden aikana, taajuushäiriökestoisuuteen, jännitehäiriökestoisuuteen, generaattorin ja jännitteensäätäjän ominaisuuksiin sekä toimintaan omakäytöllä. Tässä työssä keskitytään jännitteensäätöä koskeviin vaatimuksiin.

Laitoksen generaattorimuuntajan ja omakäyttömuuntajan muuntosuhteet, niiden säädettävyyden sekä generaattorin jännitealue ja magnetointi on mitoitettava ja sovitettava toisiinsa siten, että laitoksen generaattori voi verkon normaalilla käyttöjännitteellä jatkuvasti tuottaa ja ottaa vastaan tietyn loistehon.

Generaattorin tulee nimellisteholla toimiessaan tuottaa jatkuvasti 70 % PQ-diagrammin mukaisesta nimellisloistehosta generaattorin liitinjännitteen laskettua 90 %:iin normaalista käyttöjännitteestä.

Generaattorin on kyettävä jatkuvasti ottamaan alimagnetoinnissa vastaan loistehoa generaattorin nimellisarvoilla laaditun PQ-diagrammin edellyttämällä tavalla myös

verkon maksimijännitteillä 420, 245 ja 123 kV, mikäli stabiilin käytön muut edellytykset ovat voimassa.

Generaattorit

Generaattorin reaktanssien tulee olla niin pieniä kuin teknisesti ja taloudellisesti on mahdollista, jotta tuettaisiin järjestelmän staattista stabiilisuutta ja loistehon kompensointia. Alle 500 MVA generaattorin kyllästyneen oikosulkusuhteen K_c pitää olla $\geq 0,5$ ja kyllästyneen pitkittäisen muutostahdireaktanssin X'_d pitää olla $< 0,35$. Vastaavat arvot yli 500 MVA generaattorille ovat $K_c \geq 0,43$ ja $X'_d \leq 0,42$.

Jokaisen generaattorin pitää pystyä toimimaan jatkuvasti nimellispätöteholla vähintään tehokerroinalueella $\cos\varphi \leq 0,95_{\text{kap}} \dots \cos\varphi \leq 0,9_{\text{ind}}$.

Jännitteensäätö

Askelvastekokeella mitataan generaattorin jännitteensäädön ominaisuuksia. Tyhjäkäyvän, verkosta irti olevan generaattorin jännitteensäätäjän asetteluarvoa muutetaan askelmaisesti siten, että se aiheuttaa 10 % muutoksen generaattorin liitinjännitteeseen. Mittaukset tehdään sekä ylös- että alaspäiselle muutokselle. Molemmissa tapauksissa generaattorin liitinjännitteen askelvasteen tulee olla värähtelemätön, nousuajan 0...90 %:iin muutoksesta tulee olla staattisella magnetoinnilla 0,2 - 0,3 s ja harjattomalla magnetoinnilla 0,2 - 0,5 s noustessa ja 0,2 - 0,8 s laskiessa sekä ylityksen tulee olla korkeintaan 15 % muutoksesta.

Magnetointipiirin tuottaman korkeimman magnetointijännitteen eli kattojännitteen tulee olla staattisella rakenteella vähintään kaksi kertaa ja harjattomalla rakenteella vähintään 1,6 kertaa generaattorin kuormituspiistettä vastaava magnetointijännite. Muut jännitteensäädölle asetettavat vaatimukset on otettava huomioon. Piirin on kyettävä antamaan kattojännitteensä 10 sekunnin ajan, jottei liitinjännite laske liikaa. Kattojännitettä koskevan vaatimuksen on toteuduttava myös voimalaitoksen läheisyydessä tapahtuvan oikosulun aikana.

Järjestelmän turvaamiseksi jännitteensäätäjä tulee toteuttaa siten, että automaattisen säätäjän reservinä on vähintään käsiasäätäjä.

Kaikissa staattisella magnetoinnilla varustetuissa generaattoreissa ja kaikissa harjatto-

mallalla magnetoinnilla varustetuissa generaattoreissa, joiden teho on yli 100 MW, tulee olla lisästabilointipiiri. Lisästabilointi on viritettävä vaimentamaan generaattorin ja voimajärjestelmän sähkömekaanisia heilahteluja. Erityisesti 0,2 - 2 Hz heilahdusten vaimennuksella on suuri vaikutus. Stabilointisignaaleille on käytettävä rajoittimia, joiden asettelut voidaan valita.

Säätöjärjestelmässä pitää stabilointipiirin lisäksi olla suojaavia rajoitussäätöjä sekä loistehostatiikkalaite. Generaattorin roottorin ja staattorin virranrajoittimilla tulee olla käänteinen aikakarakteristika, jotta generaattorin ylikuormitusta voidaan hyödyntää erilaisissa käyttötilanteissa.

Generaattorin jännitteensäätöä käytetään pääsääntöisesti liitinjännitteen vakiosäätöön. Mikäli erityisistä syistä on tarvetta käyttää muuta säätötapaa, kuten vakioloisteho- tai vakiotehokerroinsäätöä, on näiden säätötapojen oltava tärkeysjärjestyksessä alemmalla tasolla kuin vakiojännitesäädön.

2.3 Jännitteensäätö

Verkon jännitettä pidetään sallituissa rajoissa kaikissa käyttötilanteissa loistehon tuotantoa ja kulutusta ohjaamalla. Reaktoreilla ja kondensaattoreilla säädetään hitaiden loistehotasapainon muutoksien aiheuttamia jännitetason vaihteluita, ja tahti-generaattoreiden jännitteensäädöllä vaikutetaan nopeisiin jännitemuutoksiin. Käämikytkimien ohjaaminen vaikuttaa jännitteiden lisäksi eri jänniteportaiden väliseen loistehotasapainoon /5/.

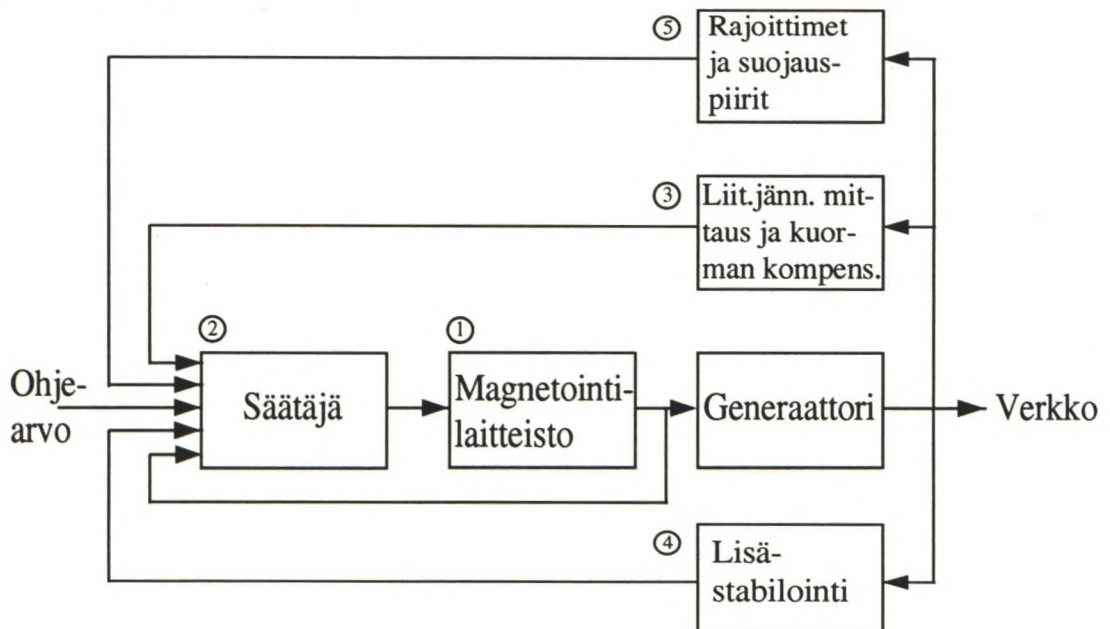
Generaattorin jännitteensäädön eli magnetointijärjestelmän tärkein tehtävä on pitää yllä ja säätää generaattorin liitinjännitettä muuttuvissa kuormitusolosuhteissa, jolloin generaattorin loistehotuotanto muuttuu ja vaikuttaa verkon loistehotasapainoon. Jännitteensäädön historia on ollut jatkuvaa kehittymistä. Vanhoissa magnetointijärjestelmissä ohjaaminen suoritettiin käsin, jotta liitinjännite ja loistehokuorma saatiin pysymään haluttuina. Ensimmäiset automaattiset jännitteensäätäjät olivat erittäin hitaita. Niitä voi verrata nopealiikkeiseen käsinsäätäjään /8/. 1920-luvun alussa keksittiin parantaa piensignaali- ja transientti-stabiilisuutta nopeiden ja jatkuvatoimisten säätäjien avulla. Parempien, nopeavasteisten magnetointijärjestelmien suunnitteleminen alkoi, ja siitä lähtien säätäjät ovat kehittyneet. 1960-luvun alussa säätäjien tehtäväkenttää laajen-

nettiin käyttämällä generaattorin liitinjännitesignaalien lisäksi taajuutta, pätötehoa ja pyörimisnopeutta ohjaamaan magnetointijännitettä. Näin pystyttiin vaimentamaan järjestelmän heilahteluja. Nykyaikaisten säätäjien vaste on hyvin nopea ja niillä on korkea kattojännite. Yllämainitut ominaisuudet saavuttaakseen pitää säätäjän

- toteuttaa ennaltamääritetyt vastekriteerit,
- olla varustettu vaatimusten mukaisilla rajoittimilla ja suojauksilla, jotta säätäjän itsensä, generaattorin ja muiden oheislaitteiden tuhoutuminen estyisi,
- olla käyttöominaisuuksiltaan monipuolinen ja joustava sekä
- saavuttaa vaadittu luotettavuus- ja käytettävyytaso, kun tarvittavan redundanssin, sisäisen virheen tunnistuksen ja eristyskyvyn vaikutukset yhdistetään.

2.3.1 Magnetointijärjestelmän osat

Kuvassa 2.3 on esitetty tyypillisen suuren tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmän periaatteellinen toimintakaavio.



Kuva 2.3 Tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmän toimintakaavio.

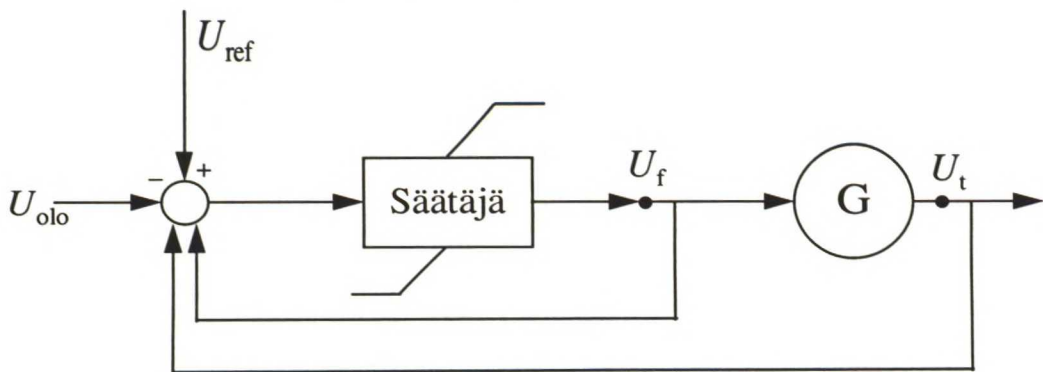
Lohkojen tehtävät ovat:

1. *Magnetointilaitteisto* tuottaa tasavirran tahtigeneraattorin magnetointikäämiin.

2. *Säätäjä* muokkaa ja vahvistaa sisäänmeno-ohjaussignaalit magnetointilaitteistolle sopivaan muotoon ja oikealle tasolle säätö-, stabilointi- ja sisäisillä rajoitin-toiminnoilla.
3. *Liitinjännitteen mittauspiireissä* tunnistetaan generaattorin liitinjännite, tasa-suunnataan ja suodatetaan se ja verrataan sitä haluttuun liitinjännitteen ohje-arvoon. Lisäksi varustukseen voi kuulua *kuorman kompensointilaitteisto*, mikäli generaattorin liittimistä sähköisesti etäällä, muuntajan takana olevassa pisteessä halutaan säilyttää vakiojännite. Laitteisto ikään kuin siirtää jännitteen mittaus-pistettä verkkoon päin vian aikana tai kompensoi kuormitetun muuntajan reaktanssin yli syntyvän jännitteenaleneman vaikutusta.
4. *Lisästabilointi* tuottaa säätäjälle ylimääräisen sisäänmenosignaalin verkon heilahdusten vaimentamista varten. Yleisesti käytettyjä signaaleja ovat roottorin nopeuspoikkeama, kiihdyttävä teho ja taajuuspoikkeama.
5. *Rajoittimet ja suojauspiirit* koostuvat suuresta joukosta ohjaus- ja suojaus-toimintoja, joilla varmistetaan, etteivät magnetointijärjestelmän ja generaattorin mitoitusrajat ylitä. Tavallisesti käytetään rajoittimia esim. maksimimagnetoinnille, liitinjännitteelle ja alimagnetoinnille.

2.3.2 Säätäjä

Kuvassa 2.4 olevan säätäjän tehtävä on ylläpitää generaattorin liitinjännitettä. Muut magnetointijärjestelmän osat on kytketty säätäjän kautta ja ne ohjaavat generaattorin magnetointijännitettä. Säätäjä reagoi liitinjännitteessä tapahtuviin muutoksiin.



Kuva 2.4 Säädön periaatteellinen toiminta.

Kun magnetoinnin asetteluarvoja muutetaan askelmaisesti, eli kuvan 2.4 arvoa U_{ref} esim. nostetaan 10 %, tekee magnetointijännite U_f alussa hyppäyksen ylöspäin ja tasoittuu sitten uuteen arvoonsa samoin kuin liitinjännite U_t :kin. U_f :n mitattu lähtöarvo herätinkoneeseen tai tasasuuntaajaan kulkee takaisinkytketysti säätäjän kautta. Säätäjä pienentää signaalien välistä eroa, kunnes lopulta U_{ref} ja uusi U_{olo} ovat yhtä suuret

2.3.3 Magnetointijärjestelmien kehitys

Analogiset integroidut piirit ovat mahdollistaneet monimutkaisten säätöstrategioiden toteutuksen, mutta viime aikoina digitaalitekniikka on vallannut alaa säätäjien rakentamisessa. Säätö- suojaus- ja logiikkapiirit toteutetaan nykyään digitaalisina. Tyristoreja käytetään edelleen teholähteinä. Tulevaisuudessa sovelletaan yhä enemmän digitaalitekniikkaa, koska se on halvempaa ja luotettavampaa kuin analogiapiirien käyttö. Digitaaliapiirien lisäetuna on suurempi joustavuus, joka mahdollistaa helpon toteutuksen kompleksisoidulle säätöstrategialle, ja lisäksi rajapinta muiden generaattorisäätöjen ja suojausfunktioiden välillä yhtenäistyy. Tulevaisuudessa käytetään adaptiivista tekniikkaa, jossa digitaalinen säätäjä oppii muuttamaan asetteluarvojaan tiettyjen ohjelmoitujen toimintamallien mukaisesti.

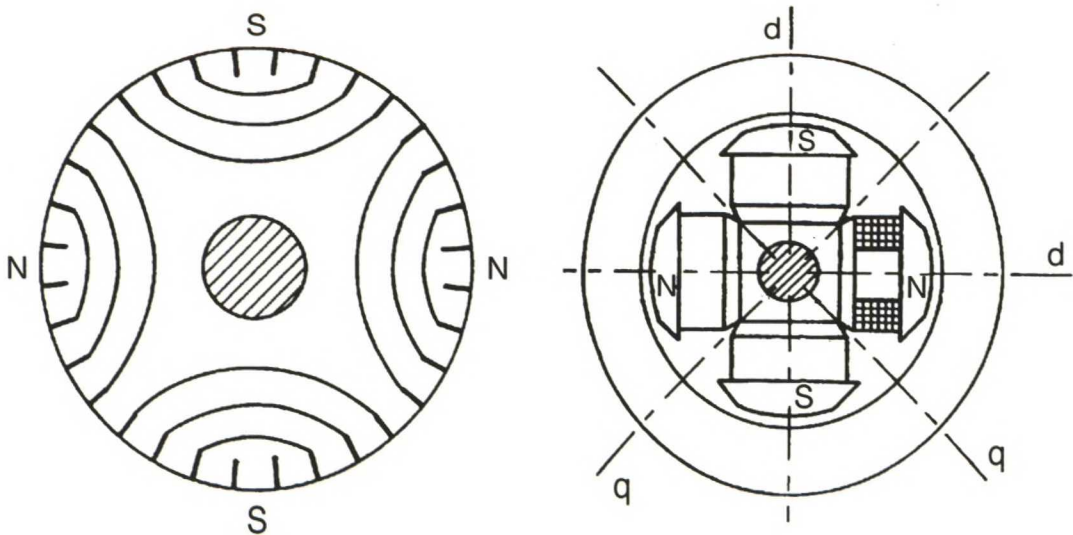
3 GENERAATTORIT

Työssä keskitytään tahtigeneraattorin ja sen säätäjien mallinnukseen, koska kaikki sähköntuotannon kannalta merkittävät generaattorit ovat tahtikoneita. Lämpövoimalaitoksissa on höyryturpiinin pyörittämiä nopeita, umpinapaisia turbogeneraattoreita, ja vesivoimalaitosten koneet ovat hitaasti pyöriviä avonapageneraattoreita.

3.1 Tahtigeneraattorin rakenne

Kuva 3.1 olevan umpinapaisen koneen roottori on sylinterimäinen levypaketti, joka on ladottu suoraan koneen akselille tai akseliin kiinnitettävälle roottorikeskukselle. Ilmaväli on mahdollisimman pieni ja kaikkialta samansuuruinen. Roottorikäämit on ladottu levypaketin uriin.

Avonaparoottorin säteen suunnassa ulommaisina ovat napakengät, kuva 3.1. Napakengät kiinnittyvät napavarsien välityksellä roottorikeskukseen tai pienemmissä koneissa suoraan akseliin. Roottorikäämit on kierretty napavarsien ympärille. Napakenkien lukumäärä on aina parillinen. Ilmaväli muotoillaan siten, että magneettivuon tiheys jakaantuu sinimuotoisesti napakengän pinnalle.



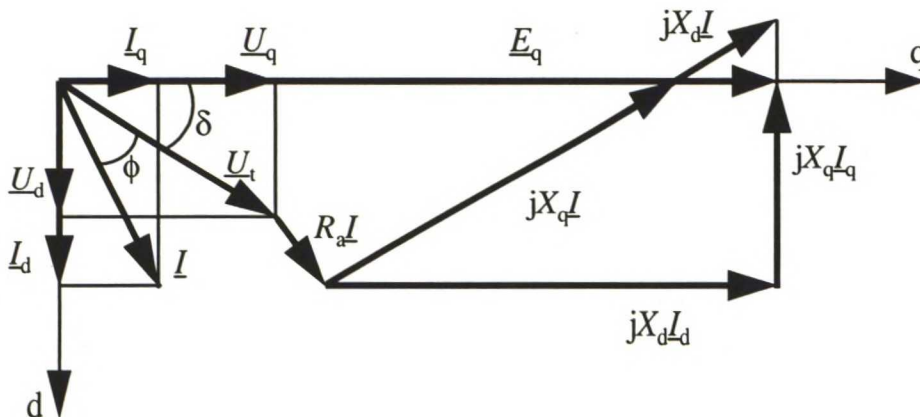
Kuva 3.1 Umpinapakoneen roottori käämityksineen (vas.) sekä avonapakone /12/.

Generaattorin roottorikäämykseen viedään magnetointilaitteistolla tasajännite, joka aiheuttaa käämeihin tasavirran. Magnetointivirta synnyttää roottorikäämien ympärille magneettikentän, joka pysyy roottoriin nähden suuruudeltaan ja suunnaltaan vakiona.

Kenttä pyörii roottorin mukana ja indusoi staattorin käämitykseen sähkömotorisen voiman. Staattorikäämitys on ladottu staattorin sisäpinnalla oleviin uriin ja se on tahtigeneraattorin varsinainen työkäämitys. Staattoriliittimiin tuotetun vaihtojännitteen kulmataajuus $\omega=2\pi f$ on sama kuin roottorin mekaaninen kulmanopeus kerrottuna napapari-luvulla (Ω_{mp}). Nopeus ei riipu generaattorin kuormituksesta vaan verkon taajuudesta.

3.2 Generaattorin mallinnus

Tyhjäkäyvän tahtigeneraattorin sähkömotorinen voima $E = E_q$, eli poikittainen smv:n komponentti, on yhtä suuri kuin liitinjännite U_t . Generaattoria kuormitettaessa staattorissa kulkeva kuormitusvirta muuttaa magneettivuota ja samalla liitinjännitettä U_t , mikäli magnetointia ei muuteta. Tämä smv:n ja liitinjännitteen välinen ero mallinnetaan generaattorin tahtireaktanssin X_d avulla. Umpinapakoneessa, jossa roottori on lieriömäisen symmetrinen, käytetään pelkkää pitkittäistä tahtireaktanssia X_d . Avonapakoneen roottori on magneettisilta ominaisuuksiltaan epäsymmetrinen, joten sen osoitindigrammissa kuvassa 3.2 on käytettävä lisäksi poikittaista tahtireaktanssia X_q . Avonapakoneen poikittaisreaktanssi on pienempi kuin pitkittäisreaktanssi, koska ilmaräli on suurempi poikittaisakselilla. Muutostilassa myös umpinapakoneen reaktanssit ovat erisuuruiset pitkittäis- ja poikittaisakselilla. Generaattorin virta ja jännite jaetaan myös pitkittäis- ja poikittaiskomponentteihin I_d ja I_q sekä U_d ja U_q . $\underline{I} = I_d + jI_q$ ja $\underline{E}_q = jE_q$.



Kuva 3.2 Avonapageneraattorin osoitindigrammi.

Kuvan 3.2 mukainen avonapakoneen jänniteyhtälö kirjoitetaan:

$$\underline{U}_t = U_d + jU_q = \underline{E}_q - R_a \underline{I} - jX_d \underline{I}_d - jX_q \underline{I}_q \quad (3.1)$$

Jännitetarkastelussa pieni staattoriresistanssi R_a jätetään usein huomiotta. Komponenttimuodossa edellisen yhtälön voi kirjoittaa:

$$U_d = U_t \sin\delta = X_q I_q - R_a I_d \text{ ja } U_q = U_t \cos\delta = E_q - X_d I_d - R_a I_q, \quad (3.2)$$

missä δ on smv:n \underline{E}_q ja liitinjännitteen \underline{U}_t välinen tehokulma /10/.

Sähköverkossa tahtikone toimii monenlaisissa muutostilanteissa. Oikosulkujen ja muiden vikojen aiheuttamat kuormitusvaihtelut ja -epäsymmetriat, taajuuden heilahtelut sekä verkkoon tahdistus ovat tyypillisiä muutosilmiöitä, joiden vaikutus lasketaan koneista tehdyillä malleilla. Mallit kuvataan yhtälöillä. Roottorin epäsymmetrian vuoksi laskelmissa käytetään roottorikoordinaatistoa, jossa vuoyhtälöiden kertoimet ovat vakiot riippumatta roottorin asennosta. Magneettisen epäsymmetrian vuoksi käytetään avaruusvektorien komponenttiesityksiä tahtikoneen kaksiakselimallin mukaisesti.

Kuvassa 3.3 on dq0 -komponentteihin perustuva tahtikoneen kaksiakselimalli. Staattorin kolmivaihekäämitys korvataan pyörivällä kaksivaihekäämityksellä d ja q. Roottorin oikosuljetut vaimennuskäämit esitetään toisiinsa nähden kohtisuorilla käämeillä D ja Q. Roottorin pitkittäisakselilla on magnetointikäämi f. Mallin eri akselien käämiryhmien välillä ei ole magneettista kytkentää. θ on roottorikoordinaatiston kulma staattoriin nähden. Seuraavissa kaksiakselimallin mukaisissa jänniteyhtälöissä alaindeksit viittaavat kuvan 3.3 mukaisiin käämiryhmiin.

Tahtikoneen kaksiakselimallin mukaiset jänniteyhtälöt ovat:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega \Psi_q \quad (3.3)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega \Psi_d \quad (3.4)$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d}{dt} \Psi_f \quad (3.5)$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d}{dt} \Psi_D \quad (3.6)$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d}{dt} \Psi_Q, \quad (3.7)$$

ja vuoyhtälöt ovat:

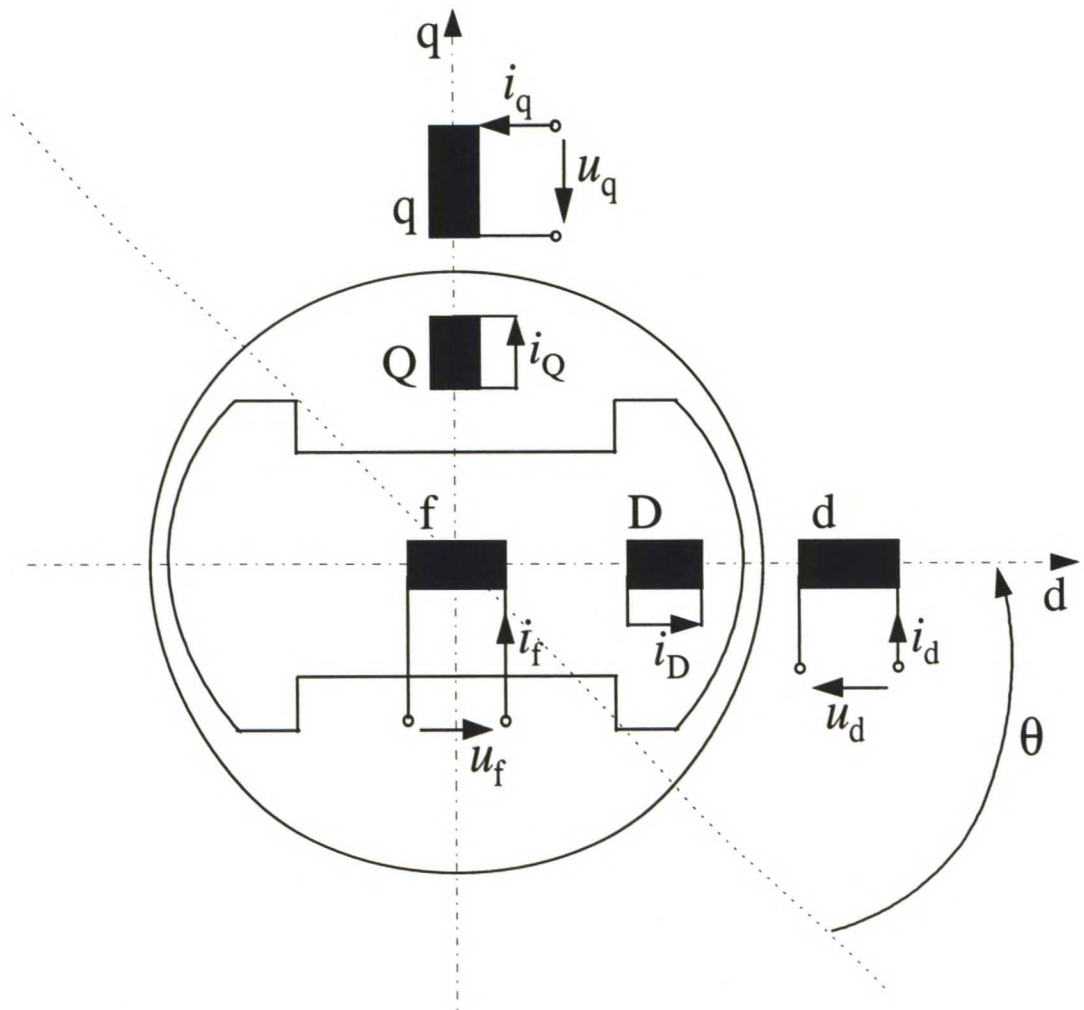
$$\Psi_d = L_{dd}i_d + L_{df}i_f + L_{dD}i_D \quad (3.8)$$

$$\Psi_q = L_{qq}i_q + L_{qQ}i_Q \quad (3.9)$$

$$\Psi_f = L_{df}i_d + L_{ff}i_f + L_{fD}i_D \quad (3.10)$$

$$\Psi_D = L_{dD}i_d + L_{fD}i_f + L_{DD}i_D \quad (3.11)$$

$$\Psi_Q = L_{qQ}i_q + L_{QQ}i_Q \quad (3.12)$$



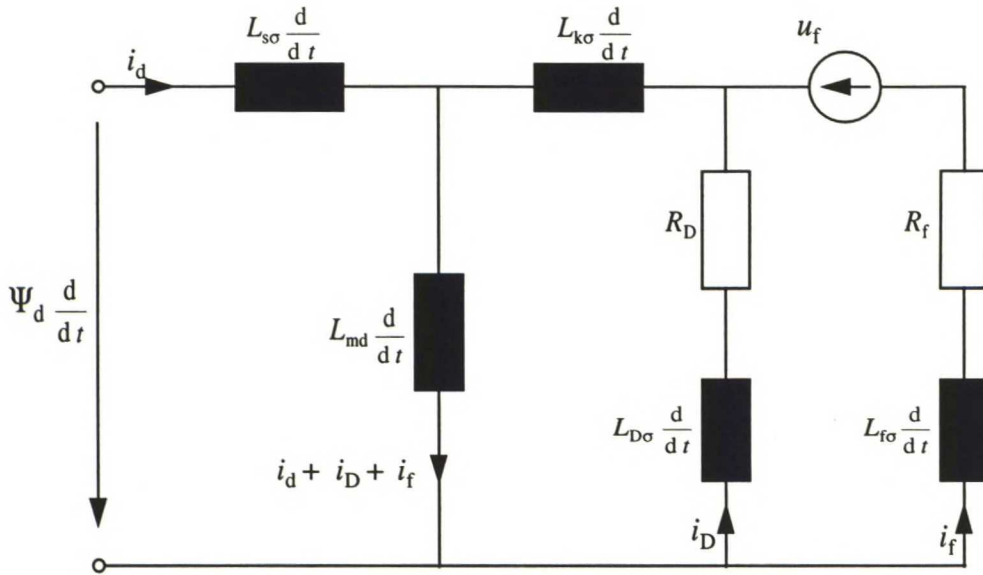
Kuva 3.3 Tahtikoneen kaksiakselimalli.

Tahtikoneen liikeyhtälö on:

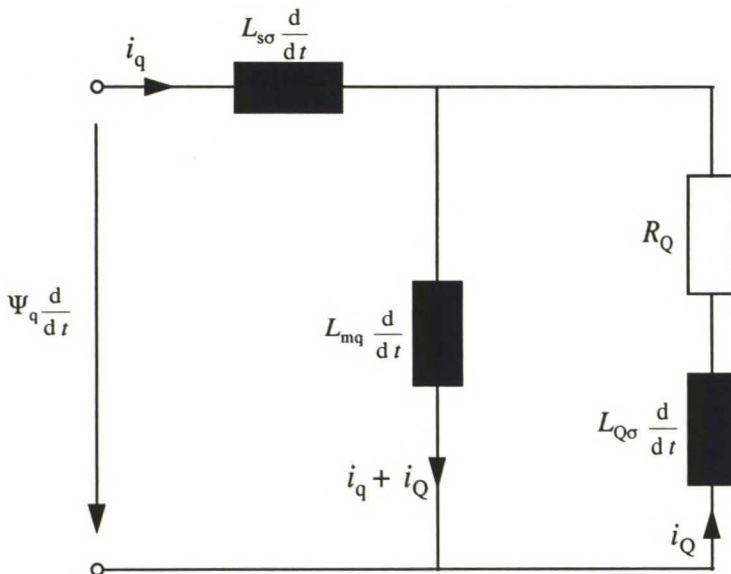
$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + T_m, \quad (3.13)$$

missä p on koneen napapariiluku, $\omega = 2\pi f$ on kulmataajuus, T_e on sähköinen momentti (negatiivinen, kun kone toimii generaattorina), T_m on mekaaninen momentti ja J on roottorin hitausmomentti.

Yhtälöiden perusteella voidaan piirtää kuvissa 3.4 ja 3.5 olevat sijaiskytkennät tahtikoneen molemmille akseleille olettaen, että keskinäisinduktanssit $L_{fd} = L_{dD}$ ovat yhtä suuria kuin magnetointi-induktanssi L_{md} ja $L_{qQ} = L_{mq}$.



Kuva 3.4 Tahtikoneen pitkittäisakselin sijaiskytkentä, $L_{fd} = L_{dD} < L_{fD}$.



Kuva 3.5 Tahtikoneen poikittaisakselin sijaiskytkentä.

Mikäli lisäksi oletetaan, että keskinäisinduktanssi $L_{fD} = L_{md}$, kuten käytännössä usein tehdään, jää pitkittäisestä sijaiskytkennästä toinen hajainduktanssi $L_{k\sigma}$ pois.

Kuvien induktanssit ovat edellisten yhtälöiden merkintöjen avulla esitettyinä:

$$L_{s\sigma} = L_{k\sigma} = L_{dd} - L_{md}, L_{D\sigma} = L_{DD} - L_{md}, L_{f\sigma} = L_{ff} - L_{md} \text{ ja } L_{Q\sigma} = L_{QQ} - L_{mq}.$$

Muutosilmiön aikana tahtikoneen pyörimisnopeus oletetaan vakioksi, jolloin yhtälöiden ratkaisemiseen voidaan käyttää Laplace-muunnosta. Muunnetut jännite- ja vuoyhtälöt ja operaattori-impedanssien johto on esitetty viitteessä /9/. Reaktanssien sijasta muutosilmiöiden laskennassa käytetään induktansseja: $L = X / j\omega$. Kerroin $j\omega$ korvataan Laplace -tasossa kertoimella s .

Tahtikoneen pitkittäinen operaattori-induktanssi on

$$L_d(s) = L_d'' \frac{\left(s + \frac{1}{T_d'}\right) \left(s + \frac{1}{T_d''}\right)}{\left(s + \frac{1}{T_{d0}'}\right) \left(s + \frac{1}{T_{d0}''}\right)} \quad (3.14)$$

ja poikittainen operaattori-induktanssi on

$$L_q(s) = L_q'' \frac{\left(s + \frac{1}{T_q''}\right)}{\left(s + \frac{1}{T_{q0}''}\right)} \quad (3.15)$$

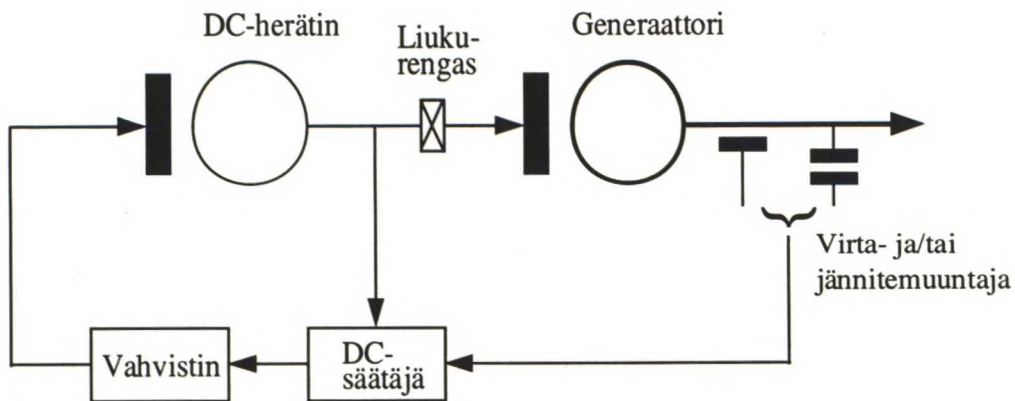
L'' ja T'' ovat alkuarvoja ja T' on muutostilan arvo. Arvot perustuvat mitattuihin malleihin muutosilmiön kulusta. Alussa koneen magneettivuo tunnistaa tietyt induktanssit L'' , jotka määritellään alkuarvoiksi. Muutosilmiön jatkuessa vuo kulkee erilaisten, muutostilan induktanssien L' kautta, ja muutosilmiön loputtua jäljelle jäävät pysyvän tilan induktanssien arvot L .

Tulevaisuudessa koneita mallinnetaan tarkemmin taajuusvastekokeesta saaduilla parametrien arvoilla sekä käyttäen numeerisia menetelmiä. Nykyään mallien arvot määritetään oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeen perusteella sekä liitinoikosulkukokeella, josta saadaan muutostilan aikavakioiden ja reaktanssien arvot.

4 MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄT

4.1 Tasasähkömagnetointilaitteisto

Tahtigeneraattorin magnetointiin käytettiin aikaisemmin, noin 1960-luvun puoliväliin mennessä valmistetuissa koneissa, ns. herätinkonemagnetointia. Siinä magnetointivirta kehitetään pääkoneen kanssa samalle akselille sijoitetulla tai vaihteen välityksellä kytkeytyllä tasasähkögeneraattorilla itse- tai apuherätteisesti ja johdetaan liukurenkaiden kautta roottorikäämitykseen. Säättäjä on sähkömekaaninen, ja sillä säädetään herätinkoneen magnetointia. Suuritehoisia tasasähkömagnetointeja on mahdollista rakentaa vain hitaasti pyöriviin koneisiin. Siksi suurissa turbogeneraattoreissa herätinkoneet on liitetty vaihteen välityksellä generaattorin akselille. Näitä magnetointijärjestelmiä on Suomessa vielä vanhoissa vesivoimalaitoksissa. Tasasähkömagnetointijärjestelmä, kuva 4.1, on hyvin hidas; tyypillinen liitinjännitteen nousuaika on 1 - 2 sekuntia.



Kuva 4.1 Tasasähköherätinkonemagnetointi.

4.2 Vaihtosähkömagnetointilaitteisto

Nykyisin ei tasasähkön kehittämiseen enää aina tarvita erillistä konetta, vaan herätinsignaaliaksi käytetään generaattorin liittimistä saatavaa vaihtojännitettä, joka tuodaan roottorikäämitykseen tasasuuntaajan kautta. Tasasuuntaaja voi pysyä paikallaan tai pyöriä akselilla, jolloin puhutaan joko staattisesta tai pyörivästä magnetoinnista. Suuntaajassa käytetyt diodit tai tyristorit kestävät suuria virrantiheyksiä ja kiihtyvyyksiä. Pienjännitekoneissa säättäjää syötetään muuntajan kautta suoraan generaattorin liitinjännitteellä, mutta suurjännitekoneissa yhteiselle akselille asennetaan lisäksi kesto-

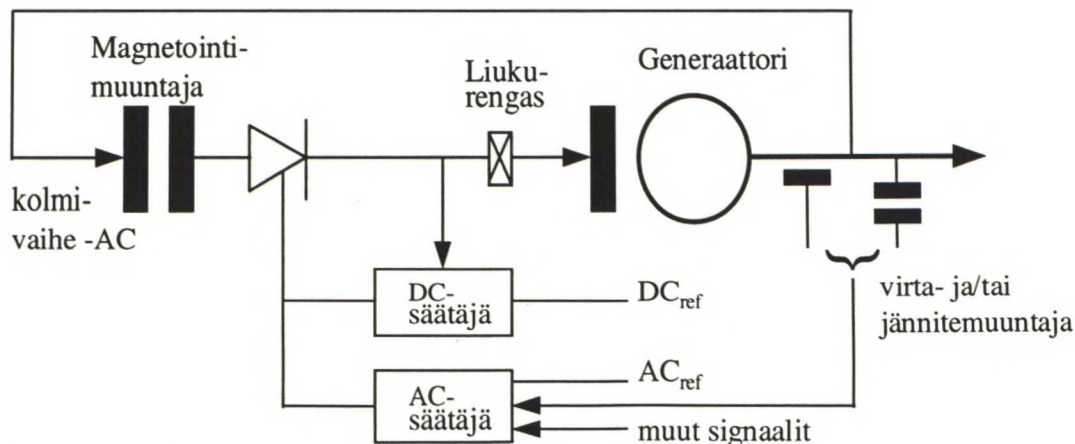
magnetoitu vaihtosähkögeneraattori säätäjän syöttöä varten. Uusissa järjestelmissä säätäjä on toteutettu elektroniikalla.

4.2.1 Staattinen magnetointi

Magnetointiteho otetaan generaattorin liitinjännitteestä tai ulkoisesta lähteestä muuntajan kautta, tasasuunnataan diodi- tai tyristorisillalla ja johdetaan kenttäkatkaisijan kautta liukurenkaiden välityksellä roottorikäämitykseen. Elektronisella säätäjällä tyristorisiltaa ohjataan siten, että magnetointivirta mukautuu reaaliajassa automaattisesti vastaamaan jokaista kuormitustilannetta. Tarvittava magnetointiteho on kaksinapaisella turbogeneraattorilla noin kolme prosenttia generaattorin tuottamasta näennäistehosta. Staattinen magnetointi on parinkymmenen viime vuoden aikana syrjäyttänyt täysin tasasähkögeneraattoreilla toteutetut pyörivät herätinjärjestelmät. Se on luotettava ja huoltovapaa, hinnaltaan edullinen sekä säätöteknisiltä ominaisuuksiltaan hyvä. Staattinen magnetointi on nopein herätinjärjestelmä. Generaattoreiden liitinjännitteiden nousuajat ovat tyypillisesti 0,15 - 0,3 sekuntia. Suomessa uusimmissa koneissa käytetään staattista tyristorimagnetointia.

a) Jännitelähde-tyristori-magnetointi (*Potential-source controlled-rectifier system*)

Tätä kuvassa 4.2 olevaa magnetointijärjestelmää kutsutaan myös liitinjännitesyötetyksi. Sen säätö tapahtuu tyristoritasasuuntaajalla ja sille on tyypillistä erittäin pieni ominaisaikavakio. Herättimen suurin ulostulojännite eli kattojännite riippuu sisäänmenon vaihtojännitteestä. Mikäli verkkovian takia generaattorin liitinjännite laskee, alenee myös magnetointijärjestelmän kattojännite. Tämä rajoitus ei aiheuta yleensä ongelmia järjestelmän nopean vasteen ja suuren vianjälkeisen kentänvahvistuskyvyn ansiosta.



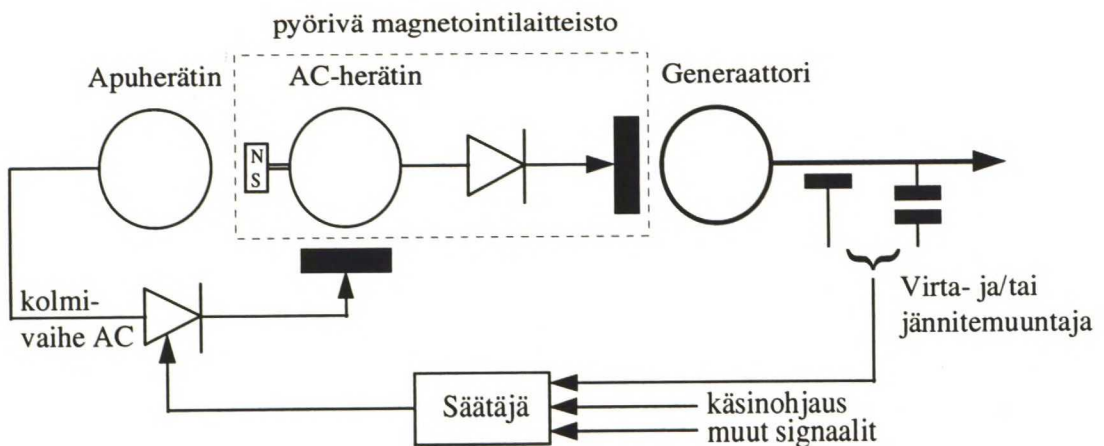
Kuva 4.2 Jännitelähde-tyristorimagnetointi.

Staatististen magnetointijärjestelmien apumagnetointi

Yleensä magnetointitehon lähde on generaattori itse. Generaattori ei tuota jännitettä ennen kuin sen roottoriin on syötetty magnetointivirtaa. Generaattoria käynnistettäessä otetaan tarvittava teho muutaman sekunnin ajan ulkopuolisesta lähteestä. Tätä kutsutaan apumagnetoinniksi. Yleensä ulkopuolisena lähteenä toimii sähköaseman akku.

4.2.2 Harjaton magnetointi

Viime vuosina on palattu pyörivien koneiden käyttöön magnetointijärjestelmissä. Suurten turbogeneraattoreiden magnetointiteho on niin suuri, ettei sitä pystytä ongelmitta siirtämään generaattorin roottoriin liukurenkaiden ja hiiliharjojen välityksellä. On kehitetty kuvan 4.4 mukainen harjaton magnetointi. Siinä herätinkoneena on kolmi-vaiheinen, ulkonapainen vaihtosähkögeneraattori, jossa magnetointikäämi on staattorissa ja vaihtosähkökäämitys roottorissa. Nopea vasteaika saavutetaan vaihtosähköherättimen suunnittelulla. Herätinkoneen roottorista saadaan vaihtovirta, joka tasasuunnataan diodilla ja johdetaan suoraan samalla akselilla olevaan generaattorin magnetointipiiriin. Pieni kestopagnetoitu apuherätin pyörii herätinkoneen roottorin ja tasasuuntaajadiodien kanssa. Apuherättimen tasasuunnattu staattorivirta syötetään vaihtosähköherättimen paikallaan pysyvään magneettikenttään. Jännitteensäätäjä ohjaa vaihtosähköherättimen kenttää, joka puolestaan ohjaa roottorin tuottamaa magnetointivirtaa. Tasasuunnattu magnetointivirta syötetään suoraan generaattorin roottorikäämitykseen ilman liukurenkaita tai hiiliharjoja.



Kuva 4.4 Harjaton magnetointi.

Harjattomalla rakenteella saadaan generaattoreihin erittäin luotettava, ulkoisen verkon häiriöistä riippumaton magnetointi, koska vikatilanteessa herätin saa pyörimisenergiaa akselilla olevasta huimamassasta. Järjestelmästä ei voida mitata suoraan generaattorin magnetointivirtaa tai -jännitettä. Harjattomalla magnetoinnilla saavutetaan noin 0,4 - 0,6 sekunnin nousuaikoja generaattorin liitinjännitteessä.

4.3 Magnetointijärjestelmän mallinnus

Kaikki magnetointijärjestelmät koostuvat samoista peruskomponenteista. Tasasähkö- tai vaihtosähköherättimen lisäksi järjestelmässä on tasasuuntaussilta, vahvistin, takaisinkytketty stabilointipiiri sekä signaalin mittaus- ja suodatuspiirit. Mallit voidaan siis esittää ilman fyysisiä komponenttejaan aikavakioiden, vahvistusten ja kyllästymisfunktion avulla. Kyllästyminen esitetään usein eksponenttifunktiolla

$$V_x = V_E S_E(V_E) = A_{EX} e^{B_{EX} E_x}, \quad (4.1)$$

missä kuvan 4.5 mukaan B on ilmapäälisuoran ja A kyllästymiskäyrän magnetointivirran arvo tietyllä liitinjännitteellä.

Magnetointijärjestelmän suureet mallinnetaan yleensä laskentaohjelmistoissa suhteellisarvoina. Myös generaattorin parametrit ovat suhteellisarvoja. Näin ohjelmistoissa käytetyt sijaiskytkentämallit yksinkertaistuvat. Samoja perusarvoja ei kuitenkaan voi käyttää, koska magnetointijännitteen suhteellisarvo on noin 0.001 generaattorin perusarvosta. Magnetointijärjestelmämallin täytyy olla yhteensopiva tahtikoneen mallin kanssa sekä magnetointijännitteen että staattorin puolelta. Herättimen ulostulojännitteen perusarvo valitaan samansuuruiseksi sen magnetointijännitteen arvon kanssa, joka synnyttää halutun liitinjännitteen kuvan 4.5 ilmapäälisuoralle.

Suhteellisarvona kyllästymisen voi esittää kaavalla

$$S_E(V_E) = (A-B)/B. \quad (4.2)$$

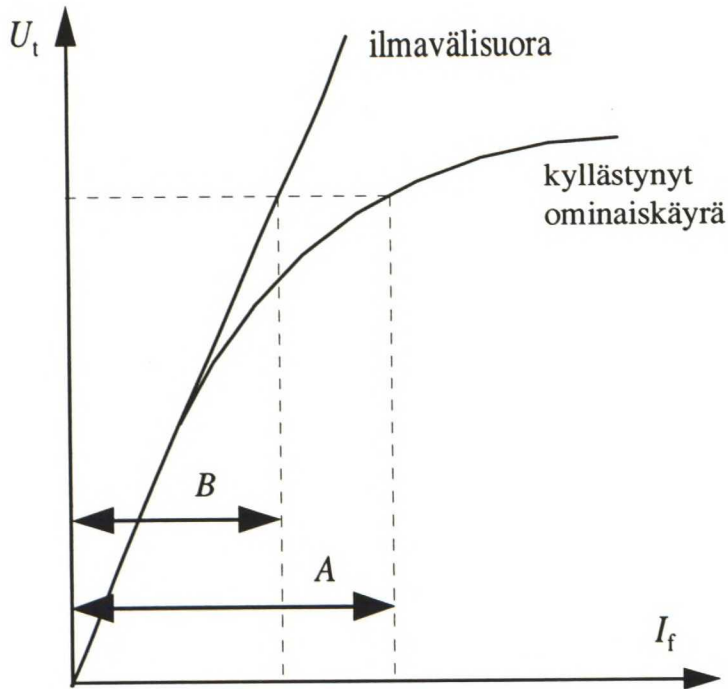
Kuvan 4.5 liitinjännitteen arvon 1.0 tuottamiseen ilmapäälisuoralle vaadittava magnetointivirta määritellään seuraavasti, kun ilmapäälisuoran kulmakerroin on L_{adu} :

$$U_t = e_q = \Psi_d = L_{adu} i_f = 1.0 \text{ pu} \Rightarrow i_f = 1 / L_{adu} \text{ pu}.$$

Vastaava magnetointijännite on: $u_f = R_f i_f = R_f / L_{adu} \text{ pu}.$

Generaattorin magnetointivirta ja -jännite ovat siis:

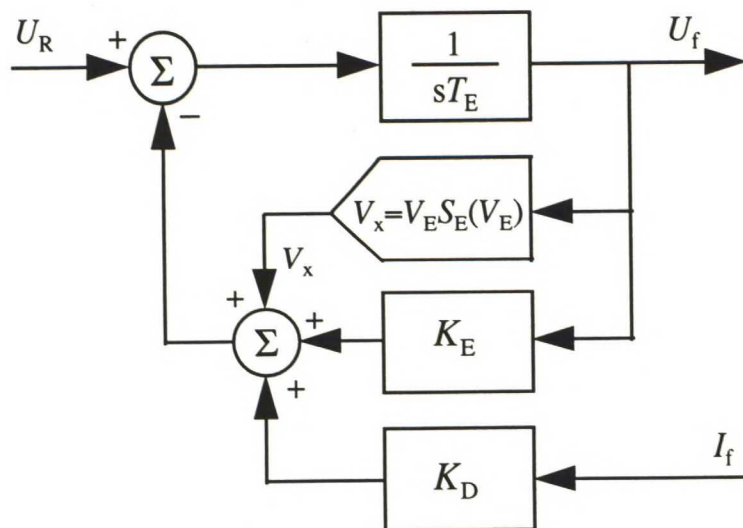
$$I_f = L_{adu} i_f = 1.0 \text{ pu ja } U_f = e_f L_{adu} / R_f = 1.0 \text{ pu .}$$



Kuva 4.5 Kyllästyminen.

4.3.1 Komponenttien mallinnus

Kuvassa 4.6 on vaihtosähköherättimen lohkokaavio. Tasasähköherättimessä kaaviosta puuttuu vahvistus K_D , joka herättimen kuormavirralla I_f kerrottuna esittää takaisinkytkentää ankkurireaktion demagnetoivasta vaikutuksesta.



Kuva 4.6 Vaihtosähköherättimen lohkokaavio.

Tasasuuntaussilta

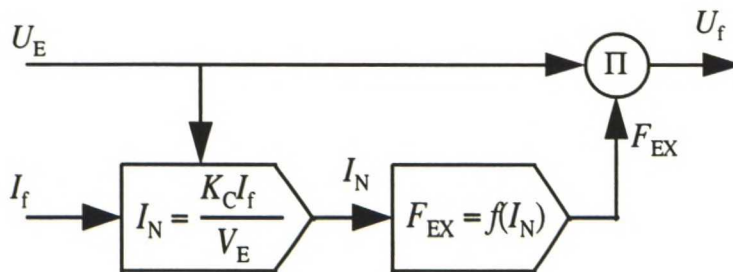
Akselilla olevassa pyörivässä tasasuuntaussillassa on diodeja. Siksi sen ulostulo riippuu herättimen tuottamasta vaihtojännitteestä ja sen omasta kommutointijännitteen-alenemasta. Kuvassa 4.7 on tyristoritasasuuntaajan lohkokaavio. Vakio K_C riippuu kommutointireaktanssista, jolla kommutointi viivästyy virran siirtyessä pulssisillan tyristorilta toiselle. Tasasuuntaajan yhtälöt on esitetty lohkojen sisällä. I_N on nimellisvirta.

Tasasuuntaajan kolmea eri toiminta-aluetta kuvaavat yhtälöt:

$$f(I_N) = 1,0 - 0,577 I_N, \quad \text{jos } I_N \leq 0,433$$

$$f(I_N) = (1,0 - 0,577)^{0,5} I_N, \quad \text{jos } 0,433 < I_N < 0,75$$

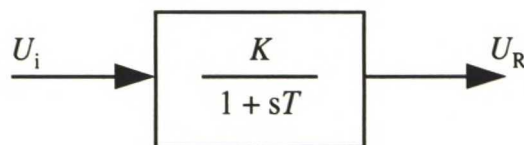
$$f(I_N) = 1,732(1,0 - I_N), \quad \text{jos } 0,75 \leq I_N \leq 1,0$$



Kuva 4.7 Tasasuuntaaja.

Vahvistin

Magnetointijärjestelmän säätöpiirin vahvistimet voivat olla magneettisia, pyöriviä tai elektronisia. Kuvan 4.8 lohkokaaviossa K on vahvistus ja T on vahvistimen aikavakio.

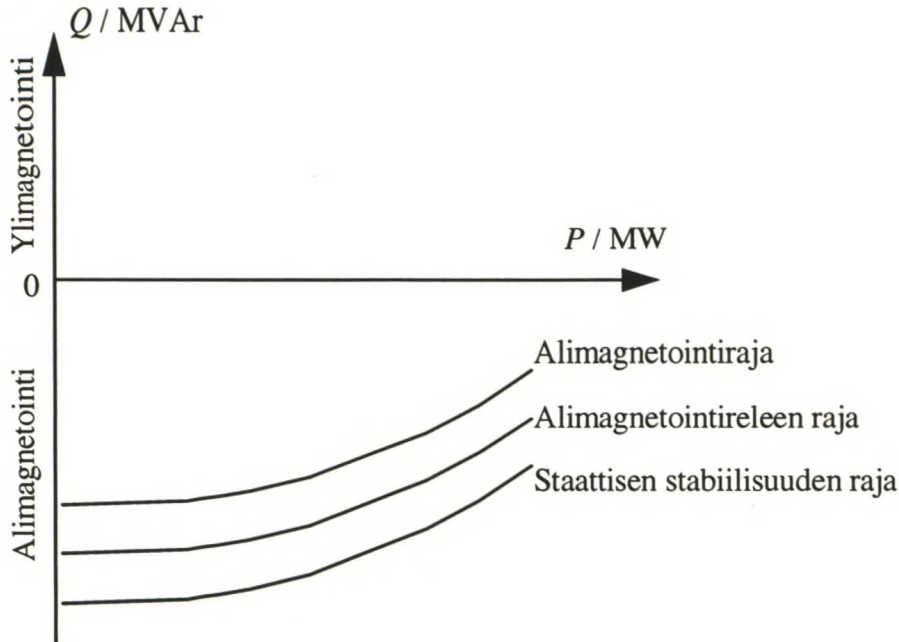


Kuva 4.8 Vahvistin.

4.4 Rajoittimet

Rajoittimilla säädetään generaattorin ali- ja ylimagnetoitumista. Alimagnetoitumista rajoitetaan, jotta koneen staattinen stabiilisuus säilyisi ja jotta staattorisydämen päätyosat eivät kuumenisi liikaa. Rajoittimen ohjaussignaali saadaan joko generaattorin jännitteen ja virran yhdistelmästä tai pätötehon ja loistehon yhdistelmästä. Alimagnetoit-

tumiselle määritetään konekohtaiset rajakäyrät P - Q -koordinaatiston loistehoakselin negatiivisella puolella. Alimagnetoitumisrajan alapuolella on alimagnetointireleen raja ja viimeisenä on staattisen stabiilisuuden raja, kuva 4.9. Stabiilisuusrajalla loistehopoikkeama saa yleensä olla vesikoneilla $< 50 \%$ ja turbiinikoneilla $< 20 \%$ nimellisloistehosta.



Kuva 4.9 Loistehon rajoja alimagnetoinnissa.

Generaattorin magnetointikäämi on suunniteltu toimimaan jatkuvasti. Ylimagnetoitumisen eli maksimimagnetoinnin rajoittamisella estetään generaattorin ylikuumentuminen, kun magnetointikäämyksen ylivirrat vaikuttavat pitempään. Mikäli ylimagnetoitumista esiintyy, saa magnetointijännitteen ja -virran suhde U_f/I_f ylittää nimellisarvonsa tietyllä prosenttimäärällä tietyn ajan, esimerkiksi:

Aika / s	10	30	60	120
U_f/I_f %	208	146	125	112

Jännite/taajuus (V/Hz) -arvo on mitattavissa oleva suure, joka on verrannollinen generaattorin magneettivuohon. Sitä mitataan, jotta generaattori ja konemuuntaja voitaisiin suojata matalan taajuuden ja/tai ylijännitteen aiheuttamalta liian suurelta magneettivuolta. Suuri vuo voi kuumentaa vaarallisesti ja vahingoittaa muuntajaa ja generaattorisydäntä. V/Hz -arvoja on myös taulukoitu generaattorin ja konemuuntajan vika-aikojen funktiona:

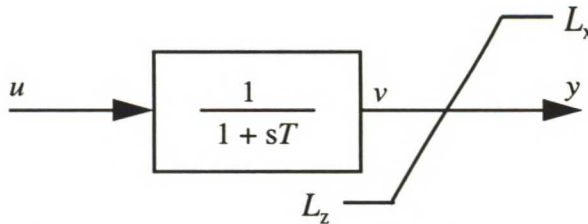
TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

V/Hz (pu)		1,25	1,20	1,15	1,10	1,05
Vika-aika /min	generaattori	0,2	1,0	6,0	20,0	∞
	konemuunt.	1,0	5,0	20,0	∞	

Yleensä automaattinen jänniteensäätäjä mittaa ja säätää jännitettä generaattorin liittimistä. Mikäli jännitettä halutaan säätää kauempaa, eli lähempää verkkoa, joudutaan mittausta korjaamaan kompensoimalla jännitteenalenemaa. Kuorman kompensatorissa säädettävällä resistanssilla ja induktanssilla kuvataan generaattoriliittimien ja halutun mittauspisteen välistä impedanssia. Tätä impedanssia käyttämällä voidaan jännitteenalenema konemuuntajan yli laskea ja lisätä mitattavaan suureen säätöä varten.

4.4.1 Rajoittimien mallinnus

Säätäjän rajoittimet voivat olla staattisia tai dynaamisia. Ne kuvataan laskennassa lohkokaavioina. Yksinkertaisimmissa malleissa säätäjälohkon nimittäjäpolynomi on pelkkä Laplace-muuttuja s . Staattiset rajoittimet ovat integrointilohkon jälkeen. Kuvassa 4.10 u on sisäänmenosignaali, v on integraattorin ulostulosignaali ja y on rajoitettu ulostulo. L_x ja L_z ovat rajoittimet jännitteelle, virralle tms. Mallissa on aikavakio T .



Kuva 4.10 Staattiset rajoittimet ja yksinkertainen aikavakio.

Systeemiä kuvaa yhtälö: $v = u / (1 + sT)$, eli:

$$vs = \frac{dv}{dt} = \frac{u - v}{T}$$

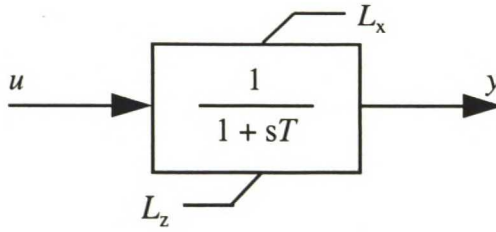
Rajoittimien vaikutus voidaan kuvata seuraavasti:

jos $L_z < v < L_x$, niin $y = v$

jos $v \geq L_x$, niin $y = L_x$

jos $v \leq L_z$, niin $y = L_z$.

Kuvan 4.11 dynaamiset rajoittimet ovat integraattorilohkon sisällä.



Kuva 4.11 Dynaamiset rajoittimet, $f = \frac{u - y}{T}$.

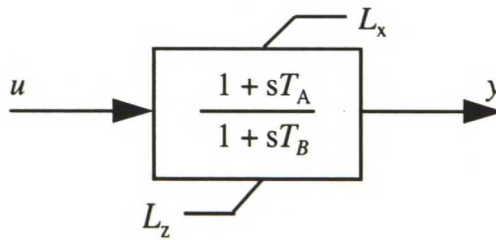
Rajoittimien vaikutus on erilainen:

jos $L_z < y < L_x$, niin $\frac{dy}{dt} = f$

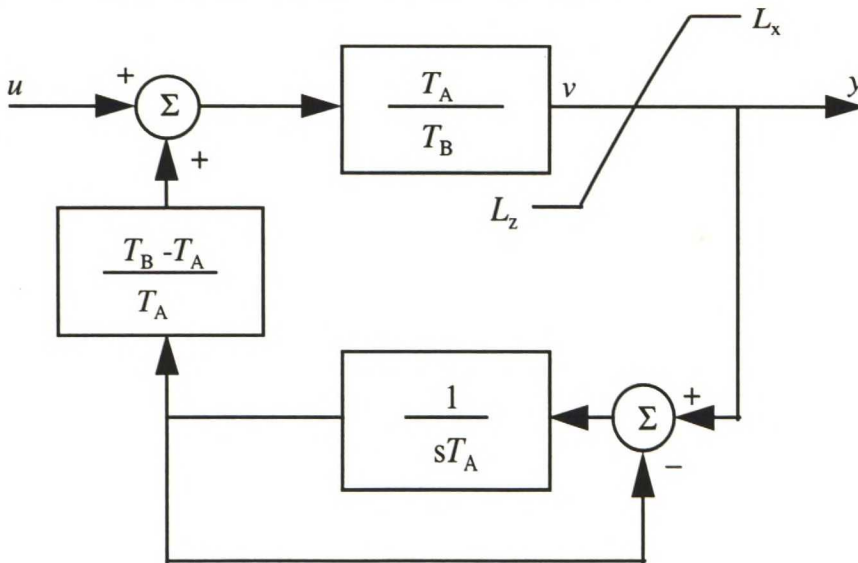
jos $y \geq L_x$ ja $f > 0$, niin $\frac{dy}{dt} = 0$, $y = L_x$

jos $y \leq L_z$, niin $\frac{dy}{dt} = 0$, $y = L_z$.

Kuvassa 4.12 on lead-lag-tyyppinen säätäjä ja kuvassa 4.13 sen toteutustapa.



Kuva 4.12 Dynaamiset rajoittimet lead-lag -säätäjässä.



Kuva 4.13 Lead-lag-säätäjän toteutus.

Rajoittimien vaikutus lead-lag-säätäjässä on:

jos $L_z \leq v \leq L_x$, niin $y = v$

jos $v > L_x$, niin $y = L_x$

jos $v < L_z$, niin $y = L_z$.

4.5 Lisästabilointi

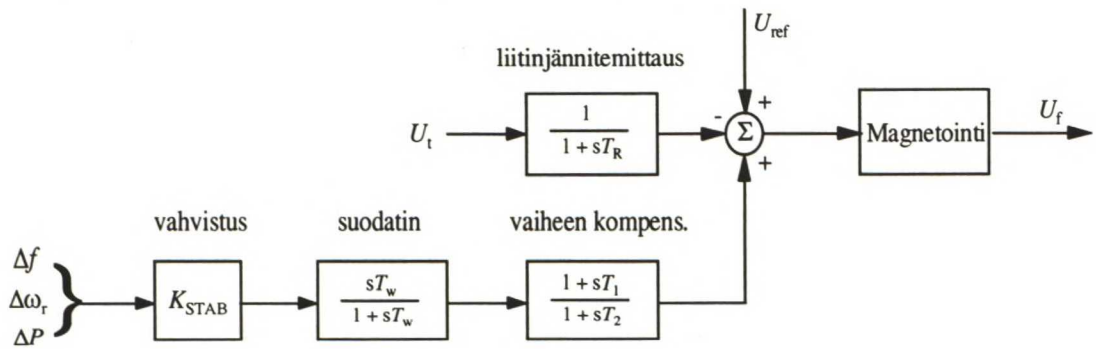
Lisästabiloinnin tarkoitus on lisätä pienitaajuisien (0,2...2 Hz) roottoriheilahtelujen vaimennusta ohjaamalla magnetointia ulkoisia stabilointisignaaleja käyttäen. Suuritaajuisia heilahteluja voidaan lisästabiloinnin lisäksi vaimentaa myös roottorin vaimennuskäämityksillä. Lisästabilointeja käytetään voimalaitoksissa, joissa on nopeat jännitteensäätäjät. Generaattorin akselin pyörimisnopeus n , verkon taajuus f , generaattorin tuottama sähköteho P_s sekä generaattoria kiihdyttävä teho $P_m - P_s$ ovat lisästabiloinnin ohjaussuureita. Useimmiten ohjaukseen käytetään sähkötehoa, jolloin lisästabilointi ohjaa magnetointijännitettä U_f generaattorin sähkötehon muutoksen ΔP_s mukaan. Ohjaussuureena kiihdyttävä teho kuvaa vaimennettavia tehoheilahteluja paremmin varsinkin suurilla heilahtelutaajuuksilla, jolloin mekaaninen turpiiniteho P_m ei muutu sähkötehon muuttuessa. Taajuuteen ja kiihdyttävään tehoon perustuvilla lisästabiloinneilla on parhaat dynaamiset ominaisuudet. Stabilointipiiri tuottaa vaimentamiseen sähköisen momentin, joka on samassa vaiheessa roottorin nopeuspoikkeaman kanssa. Generaattorin akselin vääntöväärähtelyt voivat aiheuttaa ongelmia, kun akselin pyörimisnopeutta käytetään ohjaussuureena taajuuden heilahtelujen vaimentamiseen.

4.5.1 Lisästabiloinnin mallinnus

Lisästabilointipiirin lohkokaavio on kuvassa 4.14. Kaaviossa Δf on taajuuspoikkeama, $\Delta \omega_r$ on nopeuspoikkeama ja ΔP on tehopoikkeama. Vahvistus, suodatin sekä vaiheen kompensointi muodostavat varsinaisen lisästabilointipiirin, jonka vaikutus lisätään magnetointilohkoon.

Vahvistus K_{STAB} määrää lisästabiloinnin vaimennuksen suuruuden. Ideaalitalanteessa vahvistus pitäisi asettaa vastaamaan maksimivaimennusta, mutta käytännössä sitä rajoittavaa mm. loistehon ja magnetointijännitteen heilunta. Suodatinlohkoja voi olla peräkkäin useampiakin. Niillä vaikutetaan määrättyjen taajuuspoikkeamien ohjaukseen.

Kaistanpäästösuodin päästää lävitseen esim. kaikki yli 0,2 Hz ja alle 2 Hz heilahtelut. Suodattimella on niin pitkä aikavakio T_w , että se ei reagoi pyörimisnopeuden heilahtelujen tuottamiin signaaleihin. T_w on yleensä 1...20s. Ilman suodattimia myös tehonvaihtelujen aiheuttamat nopeuden hitaat muutokset vaikuttaisivat liitinjännitteeseen. *Vaiheen kompensointi* -lohkossa kompensoidaan vaihe-ero, joka syntyy takaisinkytkennän aikana magnetointilaitteiston sisäänmenosignaalin ja generaattorin ilmväli-momentin välille. Käytännössä kompensointilohkojakin on useampia peräkkäin.



Kuva 4.14 Lisästabilointipiiri tyristorimagnetoinnissa.

4.6 Magnetointijärjestelmän ominaisuuksia

Ohjatun magnetointijärjestelmän käyttäytymiseen vaikuttavat voimajärjestelmän, säädettävän generaattorin ja sen magnetointilaitteiston ominaisuudet yhdessä. Koska järjestelmä kokonaisuudessaan on epälineaarinen, sen toiminnan esittäminen on jaettava erikseen suursignaali- ja piensignaalmalliin. Suursignaalmallissa epälineaarisuudet ovat merkittäviä suurten vikojen yhteydessä, ja piensignaalmallissa järjestelmän vaste on lineaarinen pienten häiriöiden tapauksissa. Vertailusuureina ovat suursignaalmallissa mm. magnetointijärjestelmän kattojännite ja jännitteen askelvaste ja piensignaalmallissa taajuusvaste.

4.6.1 Kattojännite

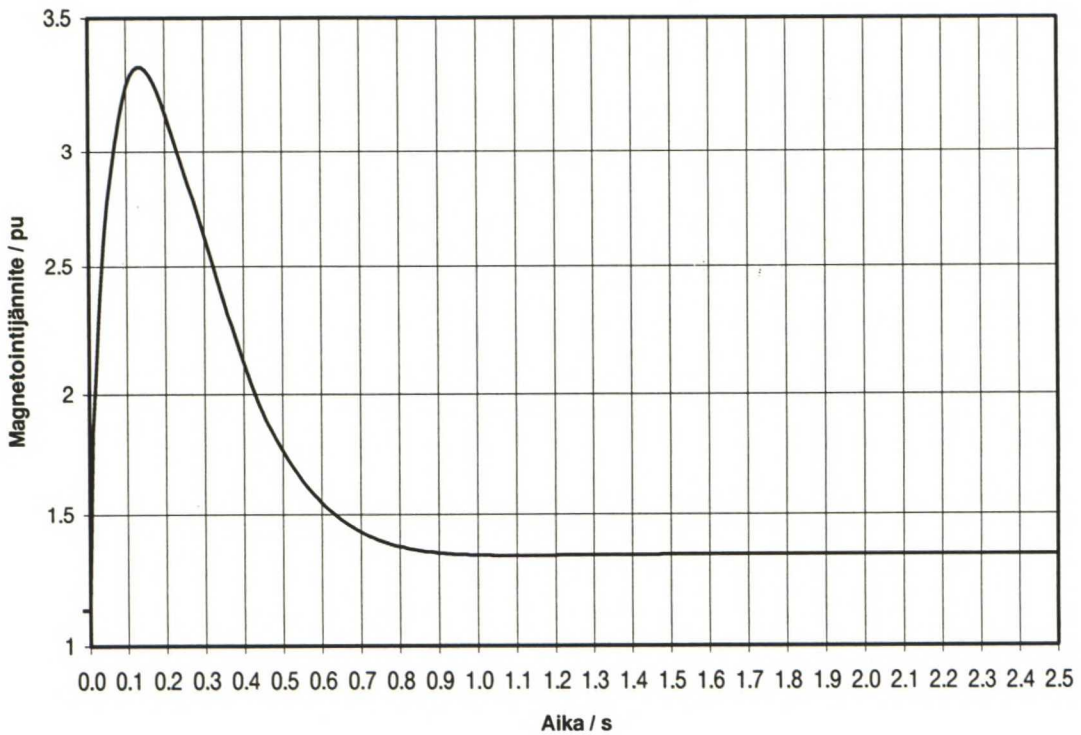
Kattojännite on suurin tasajännite, jonka herätin pystyy syöttämään tietyissä olosuhteissa. Kattojännitteen suuruus on verrannollinen järjestelmän kentänvahvistuskykyyn, ja korkeammalla kattojännitteellä saavutetaan parempi transienttistabiilisuus. Staattisille magnetointilaitteistoille, jotka ottavat magnetointitehonsa generaattorin liittimistä, kattojännite on määritetty tietyillä generaattorin liitinjännitteen ja staattorivirran arvoilla. Pyörivissä herätinjärjestelmissä kattojännite on sidoksissa nimellisnopeuteen.

Koneissa, jotka eivät kyllästy, kattojännite on säätäjän rajoittimien määräävä suurin arvo. Kattojännitettä testattaessa normaalikuormituksessa olevan koneen jännitteen-säätäjän asetteluarvoihin tehdään niin suuri muutos, että herättimessä magnetointijännite nousee heti ääriarvoonsa ja pysyy siellä. Joissakin magnetointijärjestelmissä kattojännitteelle määritetään sekä positiivinen että negatiivinen arvo.

4.6.2 Vaste

Jännitteen askelvastetta mitataan sekä magnetointijännitteen että generaattorin liitinjännitteen nousunopeudesta ja käyrämuodosta, kun säätäjän asetteluarvoa muutetaan tyhjäkäyvässä generaattorissa askelmaisesti esim. 10 %.

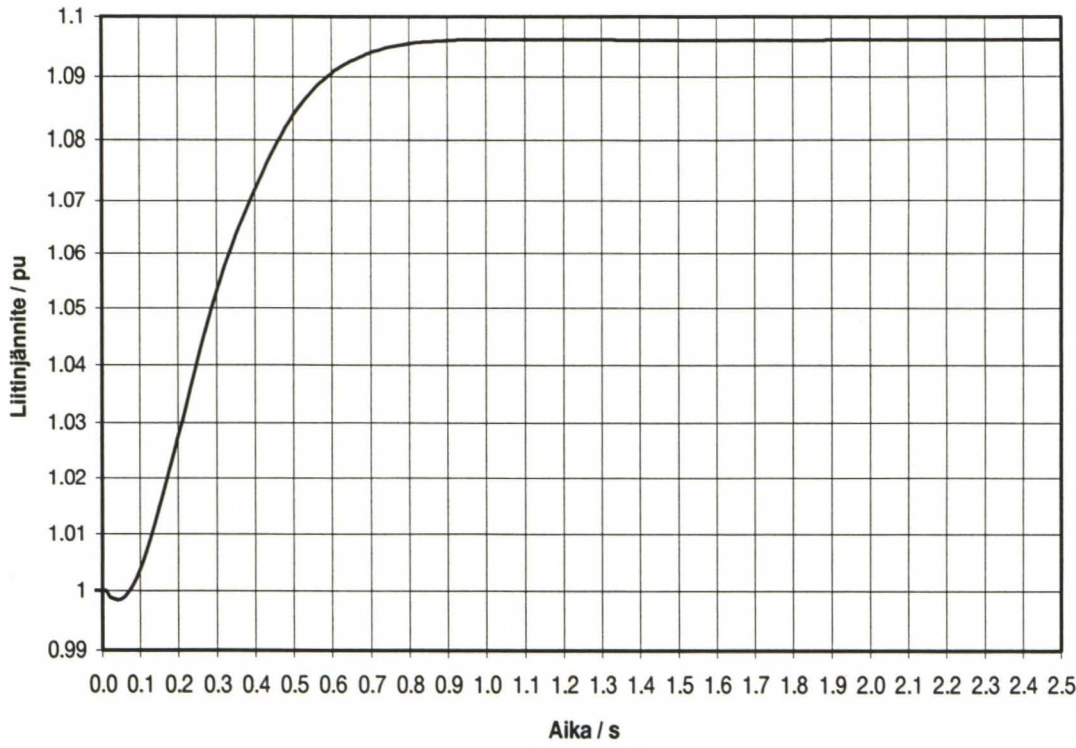
Herättimen syöttämä magnetointijännite U_f on käyrämuodoltaan kuvan 4.15 mukainen. mennessään generaattorin roottoriin.



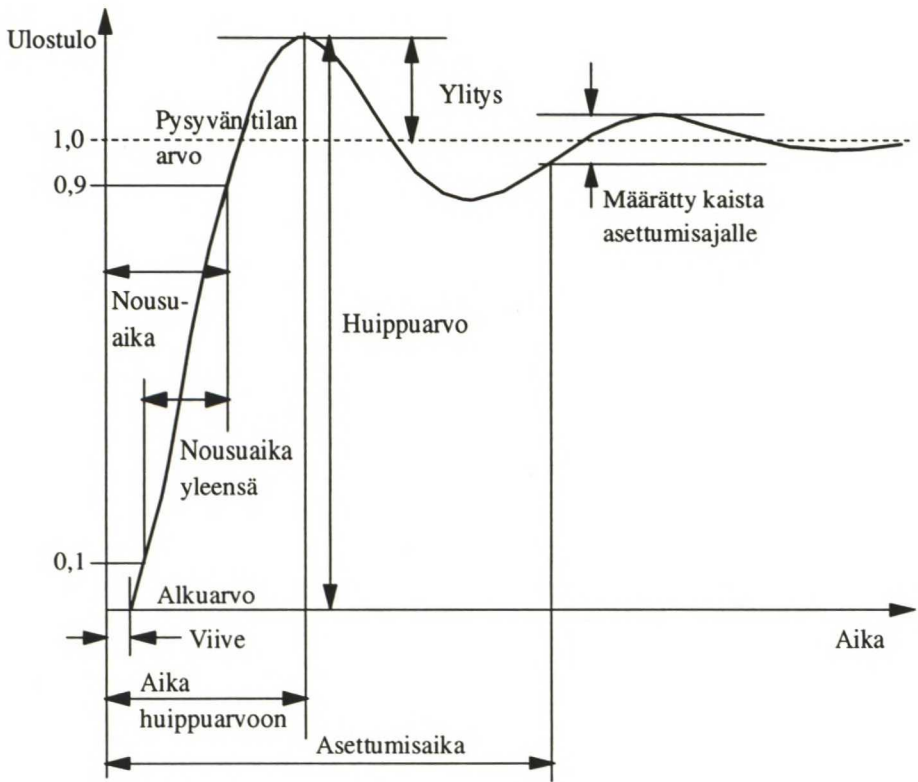
Kuva 4.15 Magnetointijännite U_f .

Generaattorin roottori-induktanssin vaikutuksesta magnetointijännite indusoi staattorin liittimiin tasaisemmin nousevan jännitteen U_t , kuva 4.16. Liitinjännitteen käyrämuodosta nähdään nousuaika, mahdollinen ylitys ja asettumisaika. Kuvan 4.17 askelvastekäyrästä näkyy arvojen määrittäminen. Suomessa generaattoreille on asetettu tietyt järjestelmätekniset vaatimukset näille arvoille luvun 2.2.3 mukaisesti. Suomen

koneissa generaattoreiden jännitteiden nousuajat ovat tyypillisesti 0,3 - 2 s.

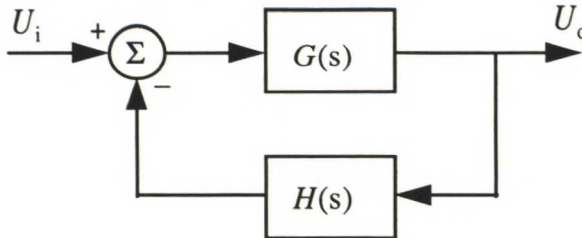


Kuva 4.16 Liitinjännite U_t , nousuaika 0.59 s.



Kuva 4.17 Askelvastekäyrä.

Lineaarisessa järjestelmässä pysyvän tilan sisäänmenon ja ulostulon välistä suhdetta kuvataan taajuusvasteella eli vahvistus- ja vaihekäyrillä kuvan 4.19 mukaisesti, jotka ovat taajuuden funktioita. Käyrät piirretään puolilogaritmikoordinaatistoon joko suljetun tai avoimen piirin siirtofunktion perusteella. Avoimen piirin esitystä käytetään useammin, koska se on yksinkertaisempi muodostaa.



Kuva 4.18 Yksinkertainen takaisinkytkentä.

Suljetun piirin siirtofunktio on kuvan 4.18 mukaisesta takaisinkytkennästä:

$$U_o/U_i = G(s)/(1+G(s)H(s)) \quad (4.3)$$

ja avoimen piirin siirtofunktio on:

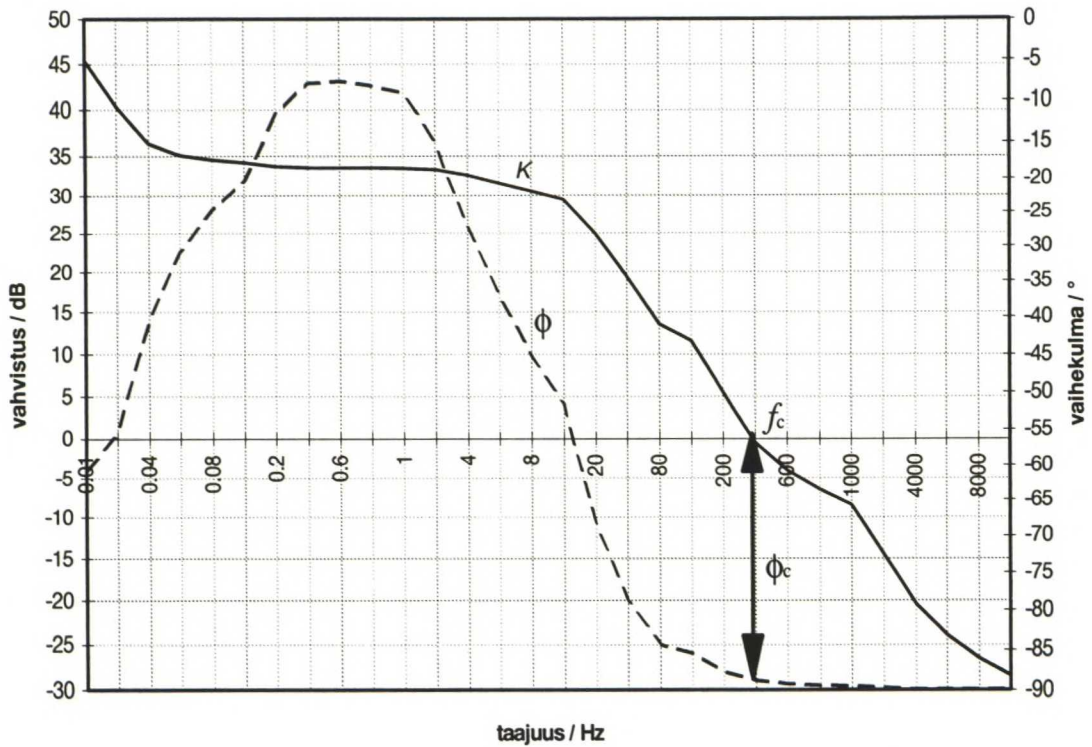
$$U_o/U_i = G(s)H(s). \quad (4.4)$$

Kuvassa 4.19 on esitetty generaattorin magnetointijärjestelmän avoimen piirin vaihe- ja vahvistuskäyrä taajuuden funktiona. Avoimen piirin käyristä tutkitaan matalan taajuuden vahvistusta K sekä crossover -kulmataajuutta ω_c , vaihevaraa ϕ_m ja vahvistusvaraa K_m , kun $K = 0$ dB. Suuremmat vahvistuksen arvot parantavat pysyvän tilan jännitteen-säätöä, ja nopeavasteisilla magnetointijärjestelmillä on suurempi ω_c . Suuremmalla vaihevaralla ja vahvistusvaralla saavutetaan stabiilimpi magnetoinnin ohjaussilmukka.

Suljetun piirin käyristä nähdään taajuuskaistan leveys ω_B , kun $K = -3$ dB, vahvistuksen huippuarvo K_p ja kulmataajuus huippuarvon kohdalla ω_p . Kaistanleveys on merkittävä suure taajuusvasteanalyyseissä. Se kuvaa järjestelmän suodatuskyvyn ja kohinavaimennuksen ominaisarvoja. Suurempi taajuuskaistanleveys saa aikaan nopeamman vasteen. Vahvistuksen korkea huippuarvo on merkki heilahtelevasta järjestelmästä ja korkeasta ylityksestä transienttivasteessa [3].

Jännitteensäätäjän virityksessä yhden arvon muuttaminen vaikuttaa heti koko vahvistuskäyrän muotoon ja sijaintiin. Karkeasti määritellen 40 ° vaihevara ja 6 dB

vahvistusvara sekä 5 - 15 % ylitys ja vahvistushuipun suhteellisarvo 1,1 - 1,6 ovat suositeltavia suunniteltaessa stabiilia ja heilahtelematonta jännitteensäätöjärjestelmää. Lisäksi säädettävän generaattorin aikavakiot ja induktanssit vaikuttavat järjestelmään yksilöllisesti, joten on vaikea määrittää mitään yleispäteviä suositusarvoja muille staattisen tilan parametreille kuten nousu- ja asettumisajalle ja taajuuskaistalle.



Kuva 4.19 Vahvistuskäyrä (kiinteä viiva) ja vaihekäyrä (katkoviiva).

4.6.3 Itsemagnetointi

Magnetointijännitteen kääntäminen negatiiviseksi auttaa säätämisessä silloin, kun generaattorin rinnalla vikatilanteessa on paljon kapasitanssia. Tällöin magnetoivassa vuossa on myös poikittaisakselin suuntainen komponentti. Kapasitanssin varaus nostaa generaattorin jännitettä, jota säätäjä yrittää laskea magnetointijännitettä pienentämällä. Muutosilmiön aikana poikittaisvuo vaimenee ja generaattorista näkyvä järjestelmän kapasitanssi X_c on suurempi kuin generaattorin poikittaisreaktanssi ωL_q .

Kun X_c on pienempi kuin ωL_q , poikittaisvuo kasvaa. Pitkittäisakselin vuo pienenee jännitteensäädön vaikutuksesta, koska liitinjännitteen täytyy olla vakio. Tietyissä pisteissä pitkittäisakselin vuon alentaminen ei enää vaikuta liitinjännitteeseen. Säätäjä jatkaa vuon pienentämistä, jolloin vuo vaihtaa suuntaa. Kokonaisvuon ohjattavuus

häviää ja liitinjännite nousee nopeasti eikä järjestelmää voi enää hallita. Ilmiötä kutsutaan itsemagnetoinniksi [1]. Itsemagnetointi esiintyy sekä vesikoneissa että turbo-generaattoreissa.

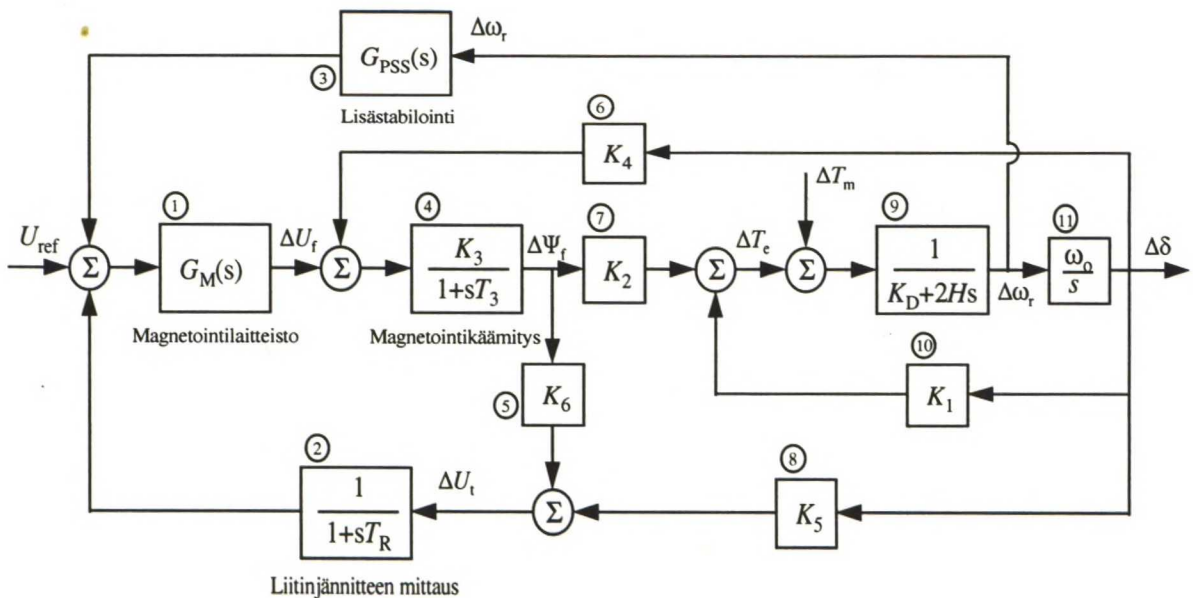
Generaattoreiden magnetointijärjestelmiin on mahdollista rakentaa negatiivista virta-kestoisuutta. Sen avulla jännitteen nousu itsemagnetoinnissa viivästyy ja viiveen aikana säätöpiiri ehtii korjata tilannetta. Näitä negatiivisia rajoittimia on käytössä joissakin Suomen vesikoneissa. Kustannussyistä niitä ei rakenneta kaikkiin magnetointijärjestelmiin.

5 VOIMAJÄRJESTELMÄN LASKENTAMALLI

5.1 Järjestelmän mallinnus

Edellisten lukujen osalohkokaavioista rakennetaan kuvassa 2.3 olevan toimintakaavion tapaan koko magnetointijärjestelmää ja generaattoria kuvaava lohkokaaviomalli, jota laskentaohjelmistoissa käytetään.

Kuvassa 5.1 lohko 1 on herätinkone ja lohko 4 on magnetointikäänitys, jotka yhdessä muodostavat magnetointilaitteiston. Lohko 2 on liitinjännitteen mittauspiiri, ja varsinainen säätäjä on kuvattu lohkojen 5, 6, 7, 8, ja 10 K -arvoilla. Generaattori muodostuu lohkoista 9 ja 11.



Kuva 5.1 Koko järjestelmän lohkokaavio.

Kaavio koostuu seuraavista osakaavioista, kun piensignaalinmallissa tiettyä suuretta pidetään vakiona:

- 6, 9 ja 11 muodostavat lohkon generaattorille jäykässä verkossa.

K_4 vastaa muutosreaktanssin takana olevasta ja jäykän verkon jännitteestä sekä koneen reaktanssista riippuvaa tahdistavaa momenttikomponenttia, K_D on vaimentava momenttikomponentti, H on hitausvakio (MWs/MVA), $\Delta\omega_r$ on kulmanopeuspoikkeama, $\Delta\delta$ on roottorikulman poikkeama ja ω_o on nimelliskulmanopeus.

- 4, 6, 7, 9, 10 ja 11 muodostamassa osassa U_f on vakio.

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta \Psi_f, \quad (5.1)$$

jossa $K_1 = \Delta T_e / \Delta \delta$ vakiovuolla Ψ_f , $K_2 = \Delta T_e / \Delta \Psi_f$ vakionapakulmalla δ ja K_3 , T_3 sekä K_4 riippuvat magnetointi-induktanssista ja -resistanssista, jäykän verkon jännitteestä sekä koneen reaktansseista /8, s. 742-759/.

- edelliseen lisätään herätin 1, liitinjännitemittaus 2, sekä osat 5 ja 8, joissa T_R on mittauksen aikavakio ja K_5 sekä K_6 riippuvat samoista arvoista kuin K_3 ja K_4 viitteen /8/ mukaisesti. Liitinjännitepoikkeama on:

$$\Delta U_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \Psi_f. \quad (5.2)$$

Magnetointijärjestelmään lisätään lopuksi lohkon 3 lisästabilointipiiri.

5.2 Ohjelma

Työssä käytetään yhdysvaltalaisen Power Technologies, Inc. -yhtiön tekemää laskentaohjelmistoa PSS/E (Power System Simulator/ Engineering), jolla voidaan simuloida sähköverkon tehonjakoa ja vikatilanteita sekä dynaamisia ilmiöitä. Dynamiikkaosan pääohjelma sisältää tarvittavan logiikan tiedon syöttöön ja tulostukseen, numeeriseen integrointiin ja sähköverkon differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen. Sähköverkon eri komponentteja kuvaavat differentiaaliyhtälöt on koottu aliohjelmakirjastoksi. Kirjaston aliohjelmiä kutsutaan aina, kun pääohjelmassa tarvitaan aikaderivaattojen numeerisia arvoja. Ohjelmiston rakenteen yksinkertaistamiseksi mallien kirjastoaliohjelmiä ei kutsuta suoraan pääohjelmasta käsin, vaan käskyt välittää erillinen aliohjelma. Dynamiikan simuloinnin tulokset talletetaan taulukoihin tulostusta varten.

Dynamiikan simuloinnissa käytettävät muuttujat voidaan jakaa ryhmiin seuraavasti /4/:

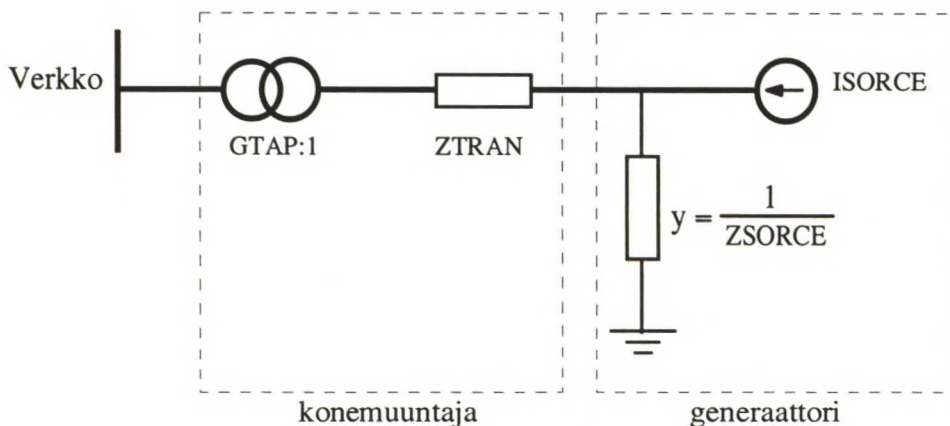
- Vakiot: parametreja, joiden arvo ei muutu simuloinnin aikana
- Tilamuuttujat: muuttujia, joiden hetkelliset arvot määräytyvät differentiaaliyhtälöiden perusteella
- Tulomuuttujat: muuttujia, joiden arvo on määrättävissä, kun kaikkien vakioiden, tilamuuttujien ja syöttömuuttujien arvot on annettu
- Syöttömuuttujat: suureita, joiden arvo määräytyy millä hetkellä tahansa dynamiikan simuloinnin ulkopuolisen logiikan määrittämällä tavalla

5.3 Generaattorimallit

PSS/E:ssä on generaattorimalleja yksinkertaisista yksityiskohtaisiin. Kaikissa malleissa on kuitenkin yhteisiä piirteitä. Erot johtuvat lähinnä vuon käyttäytymisen mallinnuksesta ja erilaisesta kyllästymisestä. Kyllästyminen esitetään kaikissa malleissa koneen tyhjäkäyntimagnetointikäyrän avulla. Simuloinnin iterointiin ohjelma käyttää generaattoreiden lohkokaaavioesityksiä, joiden siirtofunktiot perustuvat tahtikoneen operaattori-induktansseihin, yhtälöt 3.14 ja 3.15. Lohkokaaviokuvat ovat viitteessä /7/.

5.3.1 Generaattorisolmun malli

Generaattori ajatellaan yleensä konemuuntajan ja dynaamisen impedanssin kautta solmupisteeseen kytketyksi jännitelähteeksi, jonka amplitudi ja vaihe tunnetaan laskentahetkellä ja jonka virta on tarkoitus määrittää. PSS/E:ssä generaattori kuitenkin kuvataan Nortonin lähteellä, jossa jännitelähde korvataan virtalähteellä ISORCE, kuva 5.2. Lähdevirran suuruus ja vaihe määritetään joka hetki generaattorin tilamuuttujien eli roottorin vuon ja kulman sekä nopeuden funktiona. Generaattorin impedanssi ZSORCE voidaan esittää koneen muutos- tai alkutilan impedanssina riippuen valitusta generaattorimallista. Työn malleissa käytetään alkutilan arvoja X'' . Generaattorin parametrit ZSORCE, GENTAP ja ZTRAN ovat jo tehonjakomallissa, jonka pohjalta dynamiikkalaskelmat tehdään. GENTAP on konemuuntajan muuntosuhde ja ZTRAN on konemuuntajan impedanssi.



Kuva 5.2 Generaattorisolmupiste kuvattuna Nortonin lähteellä.

$$\text{Tällöin } ISORCE = (i_q - j i_d)_{\text{lähde}} (\cos \delta + j \sin \delta)$$

$$\text{ja } (i_d + j i_q)_{\text{lähde}} = (\Psi_d'' + j \Psi_q'') \omega / (\omega_o ZSORCE).$$

Yhtälöissä i_d ja i_q ovat pitkittäis- ja poikittaisakselin virrat, Ψ_d'' ja Ψ_q'' alkutilan vuot, ω_0 on $2\pi f$ ja δ on napakulma.

Generaattorin sähkömagneettisilla malleilla voidaan esittää sekä pysyvän tilan että dynaamiset ominaisuudet. Tärkeimmät pysyvän tilan suureet ovat alkutilan vuon arvot ja sen magnetointijännitteen suhteellisarvo, jolla tietty pätö- ja loistehokuormitus pysyvät muuttumattomina. Arvot esitetään koneen reaktansseilla ja kyllästyksen mallintamisella. Dynaamisista ilmiöistä tärkeimmät ovat tahdistava ja vaimentava momentti, joiden hetkelliset arvot muutostilanteessa ovat erilaiset pysyvään tilaan verrattuna. Dynaamiset ominaisuudet mallinnetaan muutostilan ja alkutilan reaktansseilla sekä aikavakioiden avulla.

5.3.2 Mallityypit

PSS/E:n epätarkimmat ja yleisimmällä tasolla toimivat generaattorimallit ovat GENTRA ja GENCLS. GENTRA on ohjelmassa ainoastaan vanhempien stabiilisuusanalyysiohjelmien yhteensopivuuden takia. Sen avulla voidaan esittää vain tahdistava momentti roottorin kulman ensimmäisen heilahduksen aikana oikosulkuvian jälkeen, mutta vaimennusta sillä ei voi mallintaa. Kun suuret, tarkastelualueesta etäällä olevat verkot halutaan kuvata ekvivalenttgeneraattorilla, voidaan käyttää mallia GENCLS, jolle lähtötiedoiksi annetaan arvot vain vaimennusvakiolle D ja hitausvakiolle H .

Ohjelman yksityiskohtaisemmat generaattorimallit ovat avonapaiset GENSAL ja GENSAE sekä umpinapaiset GENROU, GENROE ja GENDCO, jotka kaikki on mallinnettu alkureaktansseja X'' myöten. Mallin GENDCO tarkemmat yksityiskohdat on tarkoitettu vain akselin vääntörasituslaskelmiin. Oikeilla parametrien arvoilla käytettyinä malleilla pystytään laskemaan muutosilmiöitä koko 0 - 10 Hz taajuusalueella, jota ohjelmalla voidaan simuloida. Ohjelma ei aseta mitään rajoituksia simulointiajalle. Malleista johtuen kannattaa ilmiöitä simuloida kuitenkin vain 10 - 20 s, ellei myöskin pitemmän ajan kuluttua vaikuttavia komponentteja, kuten rajoittimia ja käämikytкимиä, ole mallinnettu.

5.3.3 Kyllästyminen

Kaikissa generaattorimalleissa kyllästyminen otetaan huomioon keskinäis- ja hajainduktansseissa. Avonapa- ja umpinaroottorikoneissa kyllästyminen vaikuttaa eri

reaktansseihin:

- Malleissa GENSAL ja GENTRA kyllästyksen oletetaan vaikuttavan ainoastaan pitkittäisreaktansseihin. Keskinäisinduktanssit muuttuvat muutosreaktanssin takana olevan poikittaisakselin muutostilan vuon Ψ_q funktiona.
- Malleissa GENROU, GENROE, GENSAE ja GENDCO kyllästyksen oletetaan vaikuttavan sekä pitkittäis- että poikittaisreaktansseihin. Keskinäisinduktanssit muuttuvat alkureaktanssin takana olevan vuon funktiona.
- Malleissa GENROU, GENDCO, GENSAL ja GENTRA kyllästyskäyrä oletetaan neliölliseksi. Eksponentiaalista kyllästyskäyrää käytetään malleissa GENROE ja GENSAE.

Neliöllinen kyllästyminen lasketaan ohjelmassa kaavalla

$$S = B(U_f - A)^2 / U_f, \quad (5.3)$$

jossa U_f on sisäänmenosignaali eli magnetointijännite ja A ja B lasketaan kahdessa pisteessä luvun 4.3 mukaisesti.

Eksponentiaalinen kyllästyminen (yhtälö 4.1) lasketaan ohjelmassa kaavalla

$$S = S_{1,0} U_f^X, \text{ jossa } X = \frac{\ln\left(\frac{S_{1,2}}{S_{1,0}}\right)}{\ln(1,2)}. \quad (5.4)$$

Kaikissa kuudessa mallissa kyllästyminen riippuu sekä roottorin magneettikentästä että staattorivirroista. Malleissa johdetaan koneen kyllästyneet hetkelliset parametrit sisäisellä laskutoimituksella määrätyistä kyllästymättömistä reaktanssien ja sisäisen vuon hetkellisistä vakioarvoista.

5.3.4 Vaimennus

Kaikissa malleissa roottorin liikeyhtälö lasketaan kaavalla

$$2H \frac{dn}{dt} = \frac{P_m - D_e n}{1 + n} - T_e, \quad (5.5)$$

joka on johdettu yhtälöstä (3.13). H on hitausvakio, P_m on turbiinin mekaaninen teho - $D_e n$, T_e on sähköinen momentti, n on roottorin nopeuspoikkeama suhteellisarvona, D_e

on sähköinen vaimennus eli sähkötehon derivaatta taajuuden suhteen generaattorista nähtynä ja D_t on turbiinin mekaaninen vaimennus eli turbiinitehon derivaatta akselin nopeuden suhteen.

5.4 Magnetointijärjestelmämallit

Kaikissa PSS/E:n magnetointijärjestelmämalleissa on suuritehoinen (MW) tasasähkölähde, keskitehoinen (kW) ohjauspiiri ja pienitehoinen (W) jännitteensäätäjä. Jännitteensäätäjä ohjaa magnetointilaitteiston toimintaa, mutta sen dynaaminen käyttäytyminen on usein merkityksettömämpää kuin tasasähkökoneen tai tyristorisillan epälineaarisuuksien, jotka määräävät koko järjestelmän käyttäytymisen. Siksi sekä herättimen että säätäjän aikavakioiden ja vahvistusten arvojen täytyy olla tarkasti määritettyjä.

Ohjelmassa on malleja, jotka kuvaavat tarkasti olemassa olevia laitteistoja (esim. IEEE1...5), sekä malleja, joihin on koottu tietynlaisia magnetointi-ominaisuuksia (esim. SEXS ja SCRX).

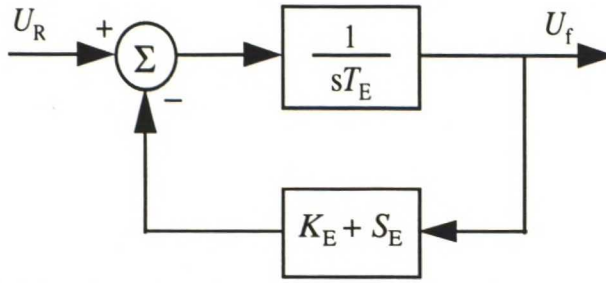
5.4.1 Tasasähkömallit

Mallit on jaettu itse- ja apuherätteisiin. Järjestelmien kyllästyminen on yksilöllistä niiden ominaiskäyrien mukaan. Kyllästyminen esitetään neliöllisellä funktiolla samaan tapaan kuin generaattoreillakin, yhtälö (5.3). PSS/E:n tasasähkömagnetointimallit ovat IEEE:n standardin -69 mukaiset IEEE1 ja IEEE4. Niitä ei enää käytetä Suomen uusissa koneissa ja vanhoista koneistakin ne ovat poistumassa.

5.4.2 Vaihtosähkömallit

Mallit ovat luvun 4 jaottelun mukaisia. Tasasuunnattavan vaihtosähkön lähteenä käytetään joko muuntajan kautta kytkettyä päägeneraattorin liitinjännitettä, akselilla pyörivää vaihtosähkögeneraattoria tai ylimääräistä käämitystä generaattorissa.

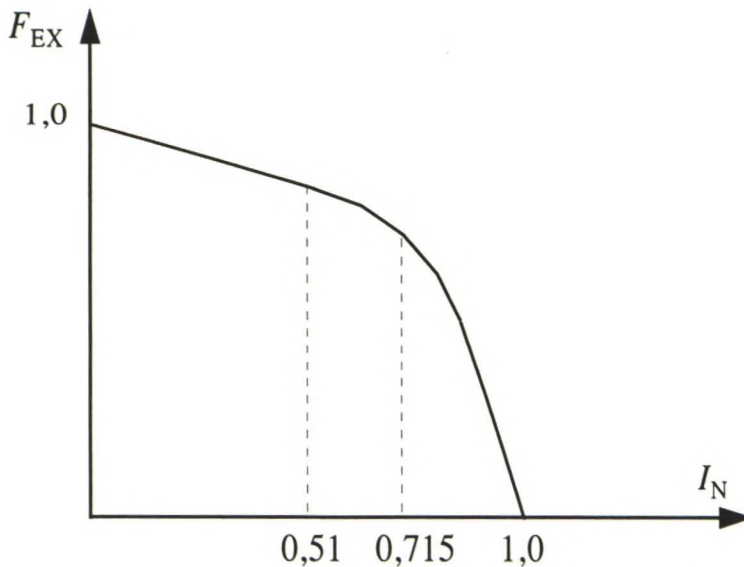
Vaihtosähkömagnetointilaitteistot ovat yleensä erillismagneetoituja. Koska tasasuuntaussilta on niiden ainoa kuormittaja, voidaan niiden magneettinen käyttäytyminen esittää riittävällä tarkkuudella samoilla lohkokaavioilla ja ominaiskäyrillä kuin tasasähkömagnetoinnin. K_E ja T_E kuvassa 5.3 voivat olla vakioarvoisia riippumatta toimintaolosuhteista vaihtosähkömagnetointia mallinnettaessa.



Kuva 5.3 Yksinkertainen herättimen lohkokaavio.

Kuvan 5.3 lohkokaaviossa herättimen ulostulojännite on riippumaton kuormitusvirrasta eli generaattorin magnetointivirrasta. Tasasähkömagnetoinnissa kuvaus on riittävän tarkka, mutta vaihtosähkömagnetoinnissa herätinkoneen tahtireaktanssi aiheuttaa liitinjännitteen aleneman kuormitusvirran noustessa. Tätä ankkurireaktiota ei vielä -69 IEEE-suositusten mukaisissa malleissa ole otettu huomioon, mutta vuoden -80 jälkeisissä malleissa on ylimääräinen lohko ankkurireaktion demagnetoivasta vaikutuksesta, kuva 4.6. Vanhoja magnetointijärjestelmämalleja käytetään verkkosimuloinneissa vielä erittäin yleisesti. Suomenkin vesikoneiden lähes kaikki säätäjät on kuvattu vanhoilla malleilla, koska ankkurireaktion vaikutus on mitätön.

Tasasuuntaajan kommutointi aiheuttaa magnetointijännitteeseen aleneman, joka voi olla merkittävä. Alenema riippuu tasavirrasta ja herättimen vaihtojännitteen tasosta kuvan 5.4 mukaan, jossa erilaisista IEEE:n suosituksia on yhdistelty. Koko käyrä on välttämätön diodisiltojen mallinnuksessa, mutta tyristorisiltojen kommutoinnin mallintamiseen riittää käyrän alun lineaarinen osa.



Kuva 5.4 Tasasuuntauksen kommutointikäyrä.

5.4.3 Jännitteensäätäjät

Aiemmin kuvatuista magnetointijärjestelmän osista muodostetaan takaisinkytkentä generaattorin liitinjännitteestä magnetointijännitteeseen niitä ohjaavalla säätäjällä. Tällaisessa lohkokaavioesityksessä magnetointijärjestelmä jaetaan kolmeen osaan, joista ensimmäinen on säätäjä ja toiseen kuuluvat muut laitteet. Generaattori on esityksen kolmas osa. Kaikki kolme osaa kuvataan PSS/E:ssä siirtofunktiolla, joka koostuu pienemmistä sisäkkäisistä siirtofunktioista. Säätäjä on luvun 4 mukaisesti mekaaninen, magneettinen vahvistin tai elektroniikalla toteutettu matalan tehotason laite.

Siirtofunktioesitys

Säätäjän siirtofunktion pysyvän tilan vahvistuksen täytyy olla suuri, jotta jännitevirhe pysyvässä tilassa olisi mahdollisimman pieni. Suuri vahvistus ei kuitenkaan sovi dynaamiseen malliin, koska generaattorin magneettikentän aikavakio synnyttää vaiheeron ja aiheuttaa heilahteluja vahvistetussa takaisinkytkennässä. Siksi yleensä suunnitellaan säätäjiä, joiden pysyvän tilan vahvistus on suuri (esim. 500) ja muutostilan vahvistus on suhteellisen pieni (esim. 30...40). Jännitteensäätäjän ominaisuudet voi esittää puolilogaritmisena vahvistuskäyränä desibeliasteikolla. Vahvistuksen pienentäminen toteutetaan monella tavalla erilaisissa magnetointijärjestelmissä. Uusissa tyristori-magnetoinneissa vahvistuskäyrä muotoillaan kokonaan säätäjän sisällä määräämällä sille siirtofunktio:

$$G(s) = \frac{K(1 + T_1 s)}{(1 + T_2 s)}, \quad (5.6)$$

jossa K on pysyvän tilan vahvistus ja $K(T_1/T_2)$ on suurten häiriötaajuuksien vahvistus. Tyypillisiä arvoja ovat $T_1 = 1$ s ja $T_2 = 10$ s. Tällöin $K = 100...400$. Vanhempien säätäjien vahvistuksen alenema toteutetaan magnetointijännitteen muutoksen suuruutta vertaavalla takaisinkytkennällä.

Säätäjän rajoitukset

Mallintamisen pitää kattaa sekä säätäjän lineaarinen siirtofunktio että kaikki sen ulostuloon vaikuttavat rajoitukset. Elektronisilla säätäjillä on laaja dynaaminen alue eikä juuri mitään rajoituksia säädettäville signaaleille. Vanhemmissa säätäjissä sen sijaan on

rajoittavana tekijänä esimerkiksi maksimiulostulo, joka määrää magnetointijärjestelmän muutostilan käyttäytymisen.

5.5 Laskennan kulku

Ennen dynamiikan simulointia muodostetaan tarkasteltavalle verkolle tehonjako. Tehonjaossa tutkitaan verkon staattista tilannetta, jossa solmupisteparametrit ovat tehonjakoiteraatiassa supenneet tiettyyn arvoon. Arvot esitetään useimmiten perusarvoihin sidottuina suhteellisarvoina. Ainoastaan tehot merkitään MW-, MVar- ja MVA-yksiköin. Tehonjakolaskelmaa varten verkosta tarvitaan seuraavat arvot:

1. Siirtojohtojen sähkötekniset käyttövakiot.
2. Muuntajan impedanssit ja muuntosuhteet.
3. Verkkoon kytkettyjen kondensaattoreiden ja reaktoreiden impedanssit.
4. Kuormitusten pätö- ja loistehonkulutus verkon jokaisessa solmussa.
5. Voimalaitosten jokaisen generaattorin pätötehotuotanto sekä sen ääriarvot.
6. Jännite jokaisessa generaattoripisteessä tai jokaisen voimalaitoksen loistehotuotanto.
7. Jokaisen voimalaitoksen loistehotuotantokyvyn minimi- ja maksimiarvo.

Tehonjakolaskelman tuloksena saadaan seuraavat arvot:

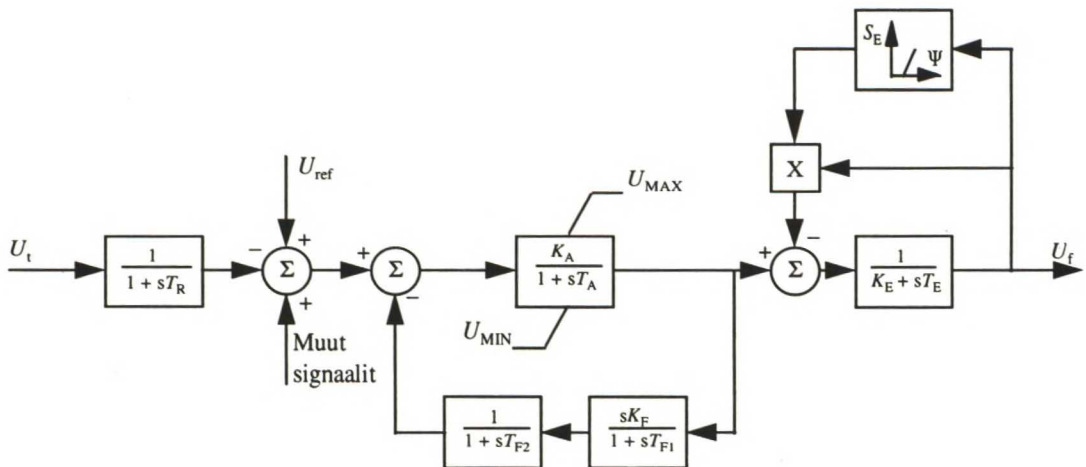
1. Jännite kaikissa niissä pisteissä, joissa sitä ei lähtötiedoissa annettu.
2. Jännitteen kulma jokaisessa verkon pisteessä.
3. Niiden voimalaitosten loistehotuotanto, joissa sitä ei ennalta määrätty.
4. Jokaisen siirtojohdon ja muuntajan kautta siirtyvä pätö- ja loisteho sekä virta.

Dynamiikan simulointia varten tehonjakotilanne muutetaan sellaiseen muotoon, jossa kaikki generaattorit kuvataan virtalähteinä. Tähän konvertoituun malliin lisätään varsinainen muunnettavissa oleva dynamiikkadatatieosto, jossa on jokaisen koneen, turpiinisäätäjän, magnetointijärjestelmän sekä lisästabilointipiirin arvot syötettyinä. Lisäksi määritellään tulostustiedosto niille verkon solmupisteiden tai johtojen arvoille (jännite, teho, kulma, taajuus ym.), joita halutaan tutkia. Tehdyllä dynamiikkamallilla simuloidaan vikaa esim. tekemällä tietynpituisen oikosulku, jonka jälkeen vika poistetaan kytkemällä johtoja irti. Vian jälkeistä tilannetta voidaan simuloida haluttu aika. Yleensä verkkolaskelmille riittää n. 10 - 15 s. Ohjelma tallettaa iterointitulokset tiedostoon, josta erillisellä piirto-ohjelmalla voidaan piirtää kuvissa halutuista arvoista.

6 LASKELMAT

Suomen kantaverkon generaattoreille käytetään PSS/E:ssä kahta eri mallia, jotka ovat GENROU ja GENSAL. Magnetointijärjestelmiä kuvataan kolmella mallilla, jotka ovat SEXS, IEEE2 ja SCRX. Niillä kaikilla voi mallintaa sekä tasa- että vaihtosähkömagnetointia.

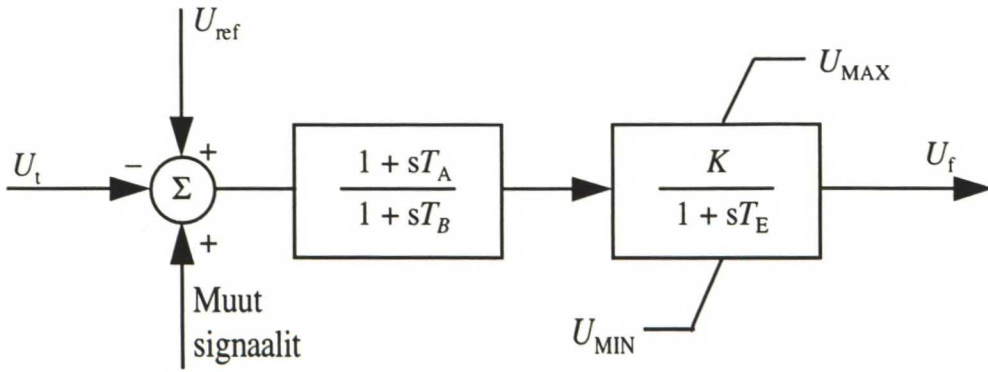
Kun kuvan 6.1 mukaista mallia IEEE2 käytetään tasasähkömagnetointiin, magnetointijännitteen alkuarvosta riippuva vakio K_E sekä rajoittimien U_{MAX} ja U_{MIN} asetetaan alussa nolliksi, jotta ohjelma voi laskennan aikana määrätä niiden arvot kaavalla $U_{MAX} = (S_E(U_2) + K_E)U_2$, jossa S_E on kyllästysfunktio ja U_2 on herättimen ulostulojännite. Käytettäessä mallia vaihtosähkömagnetointiin asetetaan K_E alussa ykköseksi. U_{MAX} ja $U_{MIN} = -U_{MAX}$ määrittyvät järjestelmän askelvastetestin tuloksena. Mallissa jännitteen stabilointisignaali on verrannollinen vahvistimen ulostuloon.



Kuva 6.1 Magnetointijärjestelmämalli IEEE2.

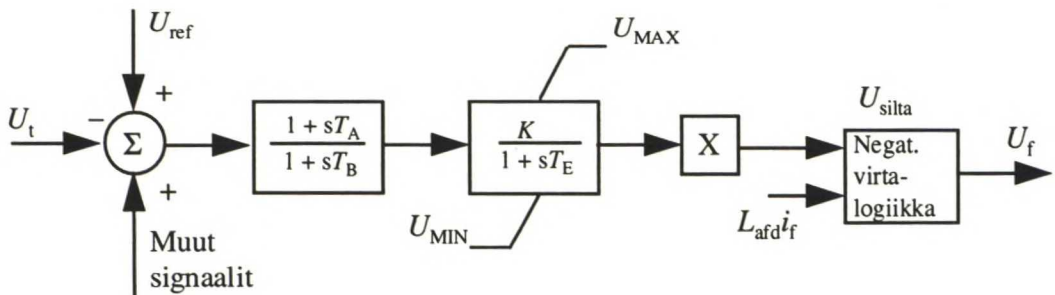
Kuvassa 6.2 olevalla mallilla SEXS voidaan esittää monenlaisia magnetointijärjestelmätyyppejä. Eniten hyötyä mallista on laskelmissa, joissa ei tiedetä oikean magnetointilaitteen yksityiskohtia, vaikka sen toiminta tunnetaan.

Kuvan lohkokaaviossa olevilla aikavakioilla T_A ja T_B pienennetään säätäjän pysyvän tilan vahvistus muutostilan vahvistukseksi. Tyypillisiä arvoja ovat: $T_A = 1$ s, $T_B = 10$ s, $K = 50 \dots 400$, $T_E = 0,05$ s, $U_{MIN} = 0$ ja $U_{MAX} = 2,5 \dots 6$ riippuen laitteiston muista arvoista. Laskelmissa alkuperäisen dynamiikkadatatiedoston SEXS -mallien pysyvän tilan vahvistus K on noin kolme kertaa muutostilan vahvistus.



Kuva 6.2 Magnetointijärjestelmämalli SEXS.

Kuvan 6.3 malliin SCRX (Bus Fed Or Solid Fed Static Exciter) on koottu ominaisuuksia tyypillisistä tyristoriohjatuista säätäjistä, joiden kommutointi ei aiheuta suurta jännitteenalenemaa. Magnetointijännite voidaan siten esittää riippumattomana herätinvirrasta. SCRX:llä voidaan mallintaa myös negatiivista virtakestoisuutta. Laskelmissa mallin SCRX aikavakiot ovat $T_A / T_B = 0.068$, $T_B = 60$ s, $T_E = 0,02$ s, $K = 100 \dots 1400$ sekä $U_{\text{MIN}} = -5.8 \dots 0$ ja $U_{\text{MAX}} = 2,8 \dots 8$. Mallin pysyvän tilan vahvistus K on noin 15 kertaa muutostilan vahvistus.



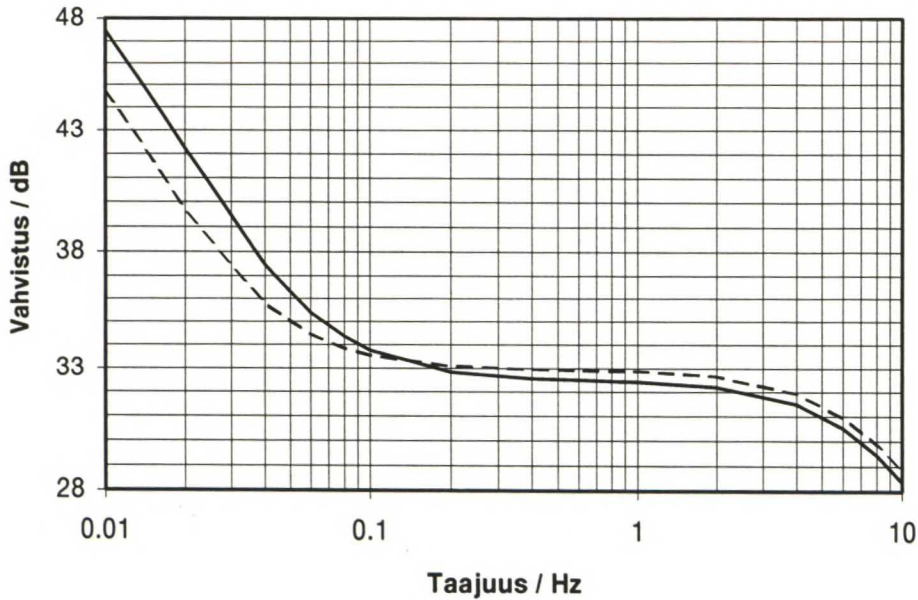
Kuva 6.3 Magnetointijärjestelmämalli SCRX.

6.1 Yhden koneen vian vaikutus

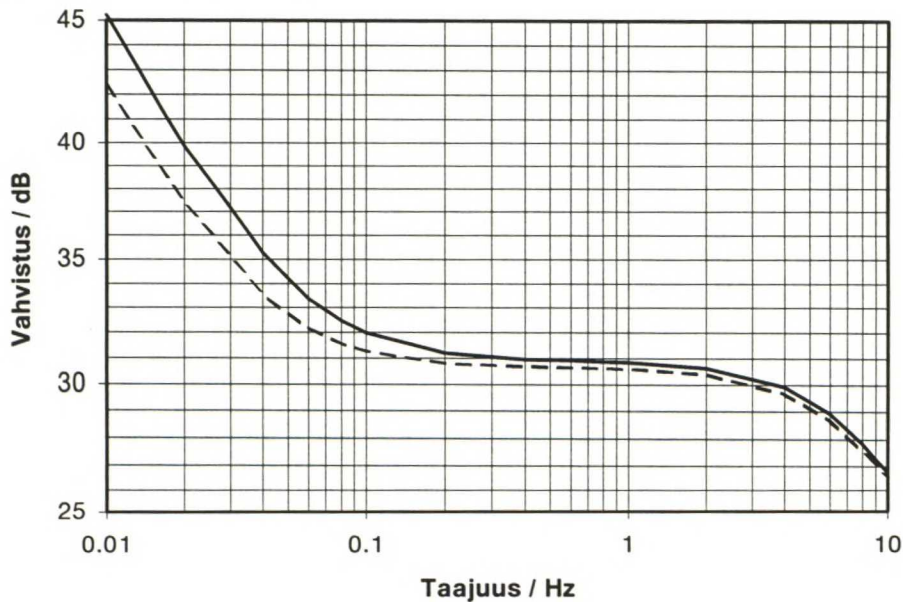
Laskelmissa Olkiluodon 825 MVA tai Meri-Porin 655 MVA koneeseen tehdään lähivika eli kolmivaiheinen oikosulku kiskoon 400 kV verkon puolelle muuttamalla kiskon ja maan välinen admittanssi erittäin suureksi. Vika kytetään halutun ajan jälkeen pois päältä muuttamalla admittanssi takaisin nolaksi, mutta muita vian jälkeisiä verkossa tapahtuvia muutoksia eli johtojen irtikytkentöjä ei tehdä. Vian jälkeistä tilannetta tutkitaan generaattorin napakulman ja pätötehon käyrämuodoista 15 s vian

jälkeen. Tässä ajassa tilanne ehtii stabiloitua tai liian suuren vika-ajan seurauksena muuttua epästabiiliksi.

Vikatilannetta simuloidaan ensin olemassa olevilla magnetointijärjestelmillä ja sen jälkeen mallilla SCRX muunnetuilla säätäjäarvoilla, joilla generaattorin liitinjännitteen nousuaika on 0,3 s, 0,5 s tai 0,8 s. Säätäjien avoimen piirin vahvistus on 0,2 - 2 Hz taajuusalueella ohjeellisissa 30 - 50 dB rajoissa kuvien 6.4 - 5 mukaan.

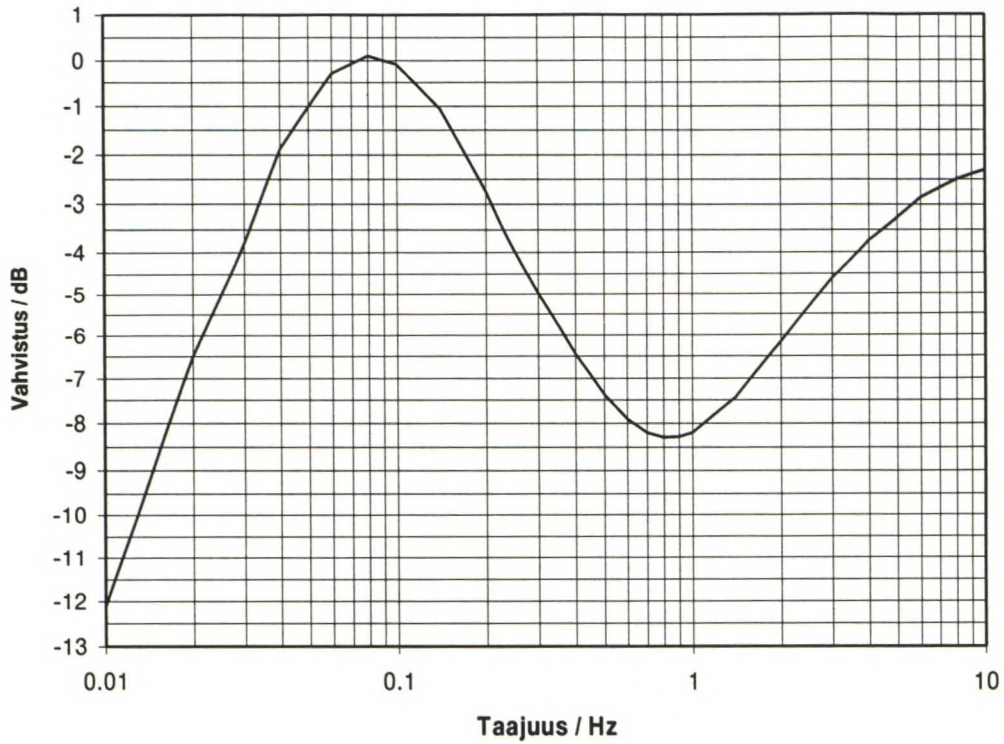


Kuva 6.4 Olkiluodon säätäjä mallilla SCRX toteutettuna, nousuaika 0,3 s. Katkoviiva = säätö vahvistuksen avulla ($K=650$) ja kiinteä viiva = säätö aikavakioilla ($T_A/T_B = 0,060$, $T_B = 45$ s, $K = 700$).

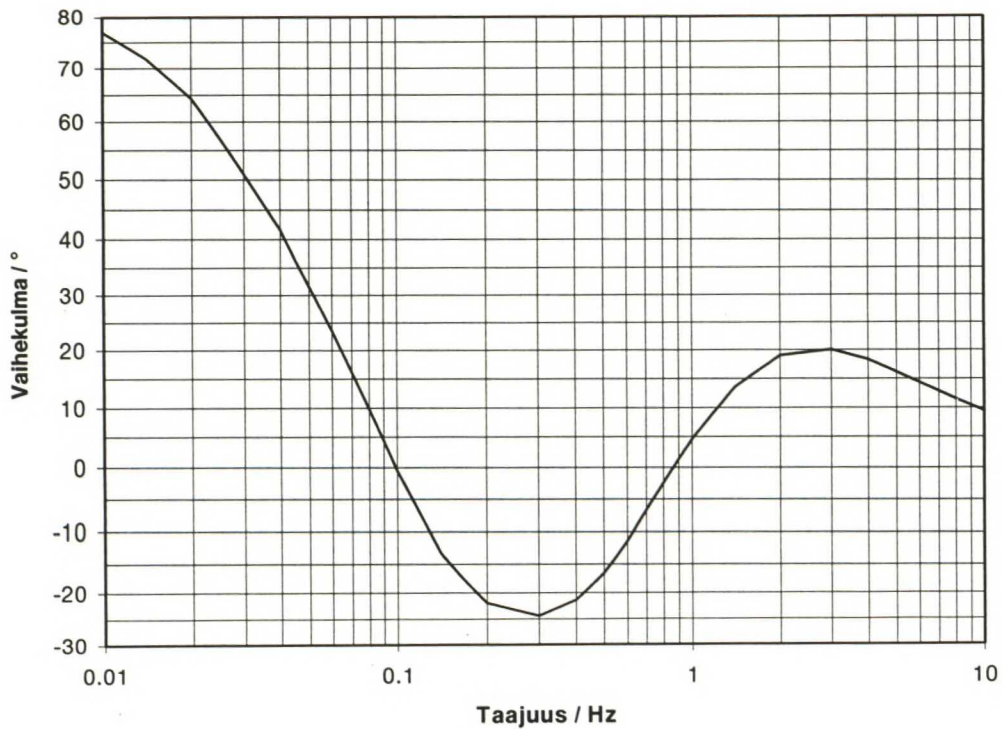


Kuva 6.5 Meri-Porin säätäjä mallilla SCRX toteutettuna, nousuaika 0,3 s. Katkoviivalla $K = 500$ ja kiinteällä viivalla $T_A/T_B = 0,050$, $T_B = 60$ s, $K = 700$.

Vika-aikaa lisätään 10 ms kerrallaan ja tutkitaan, milloin koneen napakulma kiihtyy ja koneen tehokäyrä alkaa heilahdella vaimentumatta. Kun stabiilisuusraja saavutetaan, yhdistetään säätäjään lisästabilointipiiri IVOST, jonka taajuusvastekäyrät ovat kuvissa 6.6 -7, ja lasketaan, voidaanko vika-aikaa kasvattaa.



Kuva 6.6 Lisästabilointipiirin IVOST vahvistus taajuuden funktiona.



Kuva 6.7 Lisästabilointipiirin IVOST vaihekulma taajuuden funktiona.

Generaattorin ja magnetointijärjestelmän yhdistelmä voidaan esittää kuvan 5.1 mukaisena lohkokaaavana. Staattista stabiilisuutta laskettaessa pienten muutosten menetelmällä ohjaussignaaliksi tarvittava liitinjännitepoikkeama lasketaan napakulman ja magnetointivuon poikkeamista yhtälöllä 5.2. Sähköisen momentin poikkeama esitetään resistansseista ja reaktansseista riippuvien vaimentavan ja tahdistavan osan avulla vuo-poikkeaman funktiona yhtälöllä 5.1.

Nopeavasteisissa luvun 5.1 mukaisissa järjestelmissä vakion K_5 etumerkki vaikuttaa järjestelmän stabiiliuteen. K_5 :n ollessa positiivinen automaattinen jännitteensäätäjä aiheuttaa negatiivisen tahdistavan momentin ja positiivisen vaimentavan momentin komponentin. K_5 on positiivinen, kun järjestelmän reaktanssi verkkoon nähden ja generaattorin liitinteho ovat pieniä.

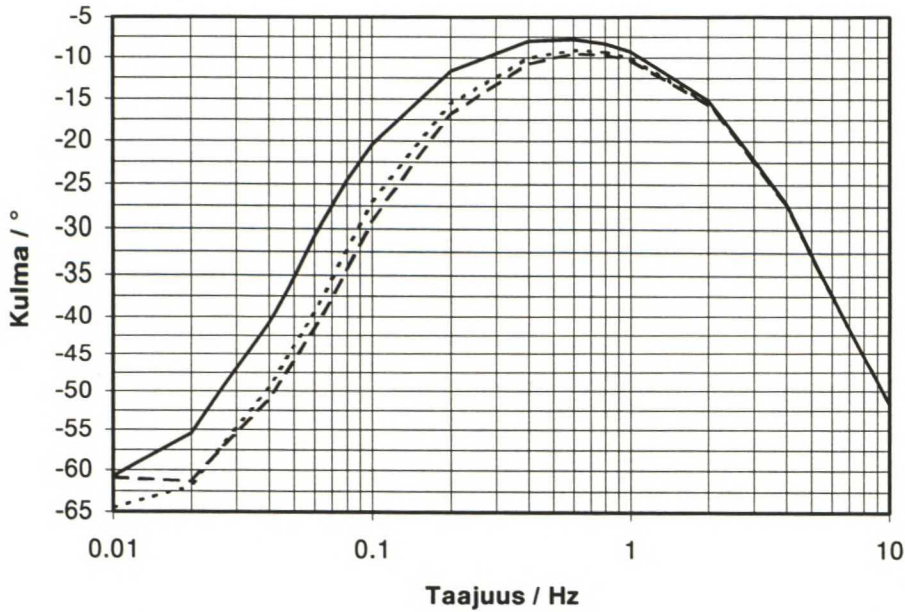
K_5 :n ollessa negatiivinen tahdistava momenttikomponentti on positiivinen ja vaimentava momenttikomponentti on negatiivinen. Vaimentava momentti siis muuttuu vahvistavaksi. Sen takia ilman rajoittimia olevilla nopeilla säätäjillä saavutetaan lähiviassa parempi stabiilisuus eli pitempi vika-aika. Kun säätäjien nopeutta ja sitä kautta tahdistavaa momenttia halutaan lisätä, magnetointijärjestelmässä täytyy käyttää lisästabilointia negatiivisen vaimentavan momentin kompensoimiseksi. K_5 on negatiivinen, kun järjestelmän reaktanssi verkkoon nähden ja generaattorin liitinteho ovat suuria, eli heikkoon verkkoon syötetään paljon tehoa. Joskus on välttämätöntä käyttää nopeavasteisia säätäjiä vaadittavan tahdistavan momentin ja muutostilan vahvistuksen saavuttamiseksi.

Magnetointijännitteen rajoittimet vaikuttavat stabiiliuteen samalla tavoin nopeissa säätäjissä, koska käytännössä ne määrittävät kattojännitteen. Rajoittimet poistamalla eli muuttamalla minimi- ja maksimirajat erittäin suuriksi voidaan säätäjästä tutkia tahdistavaa ja vaimentavaa momenttia em. tavalla.

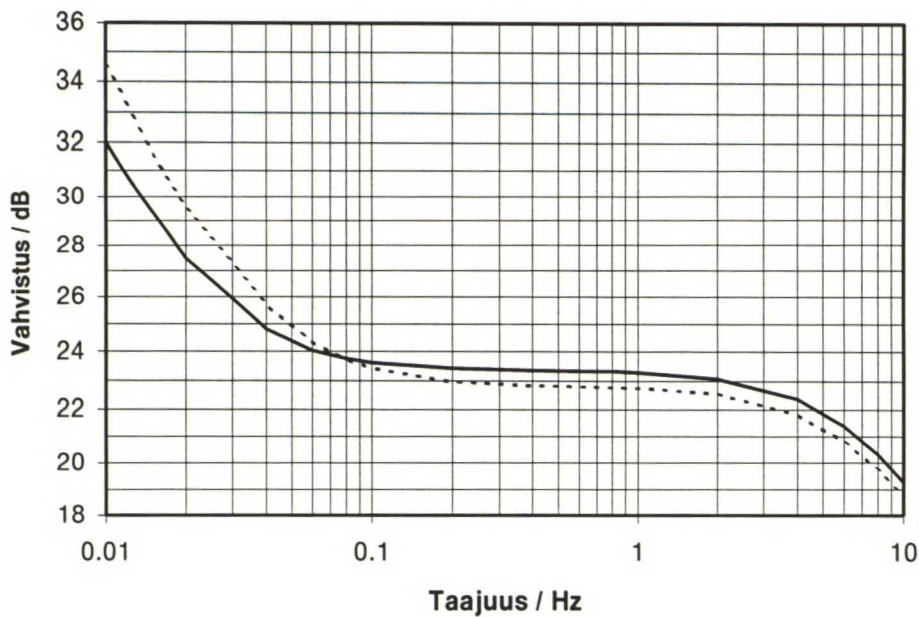
6.2 Kaikkien koneiden säätäjien vaikutus

Laskennassa Suomen kaikkiin yli 20 MVA generaattoreihin mallinnetaan SCRX-magnetointijärjestelmä. Koneille tehdään askelvastekoe, jota toistamalla ja dynamiikkadatiedostossa olevia säätäjäarvoja muuttamalla kaikkiin koneisiin saadaan kuvatuksi yhtä nopeat säätäjät. Yhdessä simuloinnissa säätäjät poistetaan kokonaan.

Säätäjät viritetään vahvistusta K muuttamalla niin, että niiden nousuajat ovat 0,3, 0,5, 0,8 ja jopa 1,6 sekuntia. Virityksen voi tehdä myös aikavakioilla, mutta SCRX-mallissa aikavakioiden muuttaminen vaikuttaa liitinjännitteen käyrämuotoon lisäämällä ylitystä. Kuvan 6.8 vaiheikäyrässä ei ero ole merkittävä aikavakio- ja vahvistusvirityksen välillä. Kuvassa 6.9 on vahvistuskäyrä 0,8 s nousuaikaan viritetylle säätäjälle. Ero nopeampaan säätäjään verrattuna näkyy ainoastaan käyrän sijainnissa desibeliasteikolla.



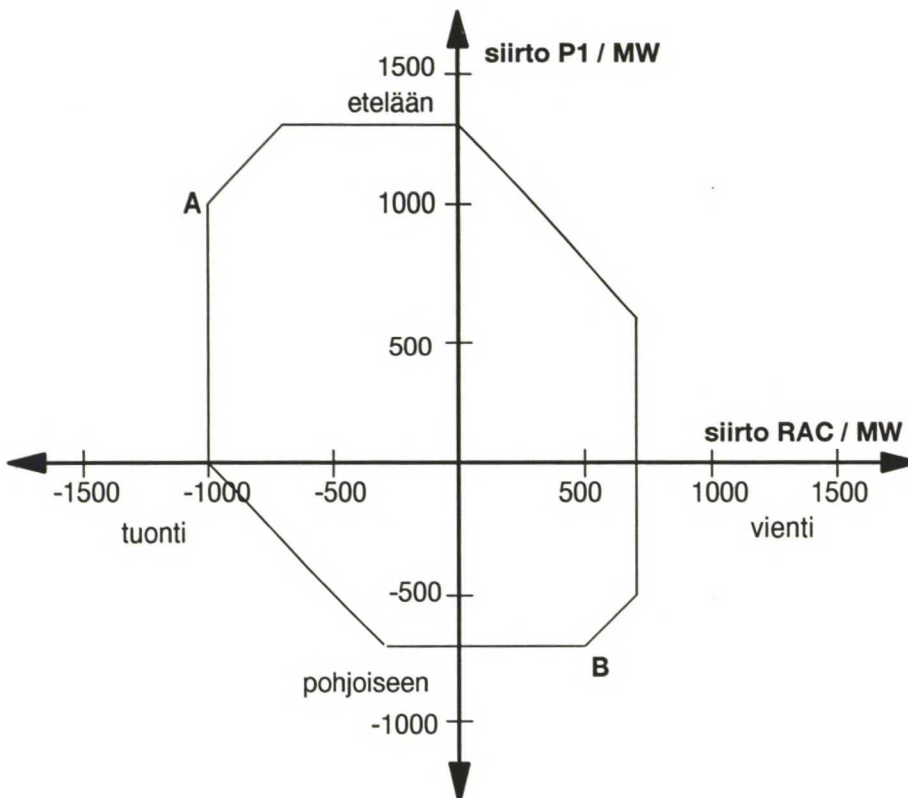
Kuva 6.8 Säätäjän vaihekulma, nousuaika 0,3 s. Kiinteä viiva = säätö vahvistuksella. Harva katkoviiva = Olkiluoto ja tiheä katkoviiva = Meri-Pori, säätö aikavakioilla.



Kuva 6.9 Meri-Porin säätäjä mallilla SCRX toteutettuna, nousuaika 0,8 s. Katkoviiva = säätö vahvistuksen avulla ($K=203$) ja kiinteä viiva = säätö aikavakioilla ($T_A/T_B = 0,021$, $T_B = 300$ s, $K = 700$).

6.2.1 Tuonti Ruotsista ja siirto pohjoisesta etelään

Kantaverkon siirtokyky määritellään ns. mitoittavien vikatilanteiden perusteella. Suomen verkossa mitoittavia vikoja ovat luvussa 2 mainittujen Nordelin mitoitus-sääntöjen mukaan mm. suurimman tuotantoyksikön eli Olkiluodon 825 MVA voimalaitoksen irtoaminen verkosta ja monen 400 kV johdon yhdistymiskohdassa olevan Petäjäskosken sähköaseman kiskon kolmivaiheinen pysyvä oikosulku. Mitoittavien vikojen jälkitilassa verkon on kyettävä siirtämään tuotettu teho häiriöittä. Suomessa on tällaisten vikojen suhteen kaksi mitoittavaa siirtoyhteyttä: vaihtosähkön siirto Ruotsista (siirto RAC) ja Suomen pohjoisosista etelään (siirto P1). Toiminta-aluekaaviossa kuvassa 6.10 suurimmaksi siirtorajaksi pisteessä A on määritetty (-1000 MW, 1000 MW). Yleensä toimitaan juuri siirtorajakoordinaatiston II neljänneksessä. Jännitestabiilisuus määrää siirtorajat. Tämä on tyypillistä, kun tehoa siirretään suuresta järjestelmästä pieneen. Rajojen sisäpuolella vikatilanteessa solmupisteiden jännitteet pysyvät $\pm 7,5 \%$ arvoissa. Siirrettäessä tehoa pienestä järjestelmästä suureen vaimennus määrää dynaamisen stabiilisuuden siirtorajat. Dynaamisen stabiilisuuden aiheuttamia siirtorajoja tutkitaan tässä työssä.



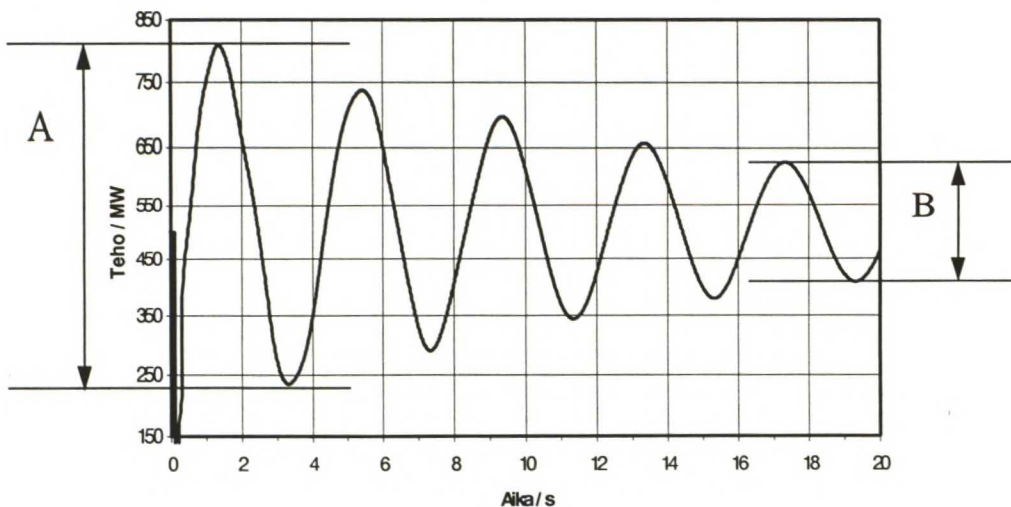
Kuva 6.10 Normaalitilan toiminta-alue.

Tilanteen siirtokykyä tutkitaan suurimpien voimalaitosten (Olkiluoto, Loviisa, Meri-Pori ja Inkoo) sekä rajajohtojen pätötehotäyryistä ja vaihekulmista. Suomen tehonsiirtoa nostetaan 100 MW kerrallaan esim. Inkoon voimalaitoksen tuotantoa vähentämällä ja Viipurin tasasähköyhteyden tuontia vähentämällä. Tehonjakotilanne muutetaan dynamiikkalaskennalle sopivaan muotoon ja siihen luetaan koneiden, säätäjien ja stabilointipiirien arvot dynamiikkadatatiiedostosta. Vikatilannetta simuloidaan 100 ms Petäjäskosken kiskovialla: Dynamiikkalaskentapuolella tehdään 100 ms oikosulku Petäjäskosken kiskoon, jonka jälkeen kiskoon liittyvät johdot irrotetaan.

6.2.2 Vienti Ruotsiin ja siirto etelästä pohjoiseen

Toisenlaisessa siirtotilanteessa toimitaan kuvan 6.10 toiminta-alueen pisteessä **B**. Siirto P1 on pohjoiseen 700 MW ja RAC on 500 MW Suomesta Ruotsiin päin. Tilanne ilmenee silloin, kun etelässä tuotetaan paljon tehoa, mutta kulutetaan vähän. Samoin pohjoisen vesivoimalaitoksissa tuotetaan sähköä, mutta pohjoisen kulutus on pieni. Tällöin mitoittava vika on Pikkaralan sähköaseman länsipuolen kiskovika: Kiskoon tehdään 100 ms kolmivaiheinen oikosulku. Vian jälkeen kisko jaetaan kahdeksi eri solmupisteeksi, joista toinen eli itäpuoli jää verkkoon, mutta toiseen eli länsipuoleen oikosulku jää vielä 100 ms ajaksi. Vasta tämän jälkeen vika poistuu ja länsipuolen johdot irrotetaan.

Tilanteen stabiilisuutta tutkitaan RAC-yhdysjohtojen tehokäyristä 20 s ajan kuvassa 6.11 esitetyllä tavalla, jolloin mitoitusääntöjen mukaisesti vaimennus on riittävä. Vaimennus lasketaan kuvasta 6.11 suhteella A/B , jonka pitäisi olla yli 2.



Kuva 6.11 Vaimennuksen laskeminen 1. ja 5. heilahduksen amplitudien suhteella.

7 TULOKSET

7.1 Yhden koneen vian vaikutus

Alkuperäisellä ja ilman lisästabilointia käytettävällä säätäjällä IEEET2, jonka nousuaika on 0,42 s, Olkiluodon stabiilisuusraja lähiviassa on 280 ms, liite 1 3/6. Kun säätäjällä SCRX muutetaan nousuajaksi 0,3 s, stabiilisuusraja on 250 ms, liite 1 1/6. Mitään eroa ei pitemmällä vika-ajalla havaita, vaikka säätäjään yhdistetään lisästabilointipiiri IVOST, liite 1 2/6. Tämä lisästabilointipiiri ei paranna kuvan 6.6 mukaan vahvistusta toivotulla 0,2 - 2 Hz heilahdusten taajuusalueella vian kannalta riittävästi. Hitaammat säätäjät 0,5 s ja 0,8 s nousuajoilla eivät lyhennä tai pidennä vika-aikaa, koska niillä on samat rajoittimet ($U_{MAX} = 8$ ja $U_{MIN} = 0$) kuin 0,3 s säätäjällä. Rajoittimien arvot lasketaan magnetointijännitteen suhteellisarvoina. Kun malliin SCRX liitetään yhtä suuret rajoittimet ($U_{MAX} = 55$ ja $U_{MIN} = -42$) kuin alkuperäisessä säätäjässä IEEET2 (liite 1 3/6), vika-aika on 280 ms, liite 1 4/6. Pitkän vika-ajan lähiviassa siis suurin merkitys on säätäjän rajoittimilla.

Liitteessä 1 sivuilla 5-6/6 on simulointitulokset myös Meri-Porin koneen lähiviasta. Siinä vika-aika on 220 ms 0,3 s säätäjää SCRX käyttämällä. Alkuperäisellä säätäjällä IVOEX koneen stabiili vika-aika on 230 ms. Alkuperäinen säätäjä on hieman nopeampi kuin 0,3 sekuntia, mutta siinäkin on pienet rajoittimet ($U_{MAX} = 6$ ja $U_{MIN} = -5,865$)

7.2 Siirtokyky

7.2.1 Tuonti Ruotsista ja siirto pohjoisesta etelään

Tuloksista tehdystä taulukosta 7.1 havaitaan, että hitaammalla säädöllä ja pienemmillä rajoittimilla stabiilisuus säilyy paremmin.

Taulukko 7.1 Säätäjien nopeudesta riippuvat siirtorajat Petäjäskosken kiskoviassa.

RAC- P1↓	nousu- aika→	ei säätäjiä	0,3 s	alkuper.	0,5 s	0,8 s	1,6 s
1200 MW		epästabiili	stabiili	stabiili	stabiili	stabiili	stabiili
1300 MW			stabiili	stabiili	stabiili	stabiili	stabiili
1350 MW			epästabiili	stabiili	stabiili	stabiili	stabiili
1400 MW				epästabiili	stabiili	stabiili	stabiili
1450 MW					epästabiili	stabiili	stabiili
1500 MW						epästabiili	stabiili

Liitteessä 2 1-3/3 on simulointitulokset rajajohtojen siirtotehoista eri säätäjillä ja pienillä rajoittimien arvolla siirroissa 1200 - 1500 MW. 0,3 s nousuajan säätäjillä Suomen kantaverkon siirtokyky on 1300 MW rajoittimien arvoilla ($U_{MAX} = 6$ ja $U_{MIN} = 0$) ja 1350 MW rajoittimien arvoilla ($U_{MAX} = 2,85$ ja $U_{MIN} = 0$). 0,8 s nousuajan säätäjillä samoilla rajoittimilla arvot ovat 1400 MW ja 1450 MW. Nykyisillä säätäjillä siirtokyky on 1350 MW. Ilman säätäjiä siirtokyky on alle 1000 MW.

7.2.2 Vienti Ruotsiin ja siirto etelästä pohjoiseen

Pikkaralan kiskovian simulointitulokset ovat liitteessä 3 1-2/2. Tuloksista tehdystä taulukosta havaitaan, että hitailla säätäjillä tehoheilahtelut vaimenevat paremmin kuin nopeilla säätäjillä. Taulukon ensimmäisessä sarakkeessa "alkuper." on tulokset verkon nykyisillä säätäjillä laskettuna. Rivillä "ei st." kaikista koneista on poistettu lisästabilointipiiri, jolloin tulokset ovat selvästi huonommat. Ainoastaan 0,8 s ja sitä hitaammilla säätäjillä heilahdusten suhde on yli 2. Viimeisellä rivillä siirtoja on nostettu 100 MW molempiin suuntiin, eli kuvan 6.10 pistettä B on siirretty ulospäin origosta katsoen.

Taulukko 7.2 Pikkaralan kiskovian jälkeisten RAC -siirtotehojen vaimennus kuvassa 6.11 esitetyllä tavalla laskettuna.

RAC- P1↓	nousu- aika→	0,3 s	alkuper.	0,5 s	0,8 s	1,6 s
(300, -700) MW			1,74			
(400, -700) MW			1,72			
(500, -700) MW		1,58	1,71	1,93	2,53	8,53
— — ei st.			1,20			
(600, -800) MW			1,45		1,98	

7.3 Johtopäätöksiä

Teoriassa nopeavasteinen staattinen tyristorimagnetointi on tehokkain ja taloudellisin tapa parantaa koko järjestelmän stabiiliutta. Se on vikatilanteissa parempi kuin hitaampi harjaton magnetointi. Magnetointijärjestelmämallilla SCR_X tätä ilmiötä ei saada suuren tuotantoyksikön lähivian simuloinneissa aikaan, koska käytetyn mallin rajoittimet vaikuttavat ensimmäisinä. Mallissa on varmistettu magnetointijännitteen syöttö liitinjännitteen romahtaessa. Nykyisillä säätäjillä stabiilisuus säilytetään paremmin lähiviassa.

TKK SÄHKÖTEKNIKA
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

Hitaalla säädöllä ja pienillä rajoittimien arvoilla saavutetaan mitoittavassa vikatilanteessa parempi stabiilisuus kantaverkon siirtokyvyssä. Magnetointijännite ei rajoittimien takia pääse nousemaan korkeaksi, mikä edelleen hidastaa säätöä. Hitaammat säätäjät eivät häiriinny vian jälkeisestä verkon heilahtelusta, jolloin solmupistejännitteet ja johtotehot pääsevät heilahtelematta nousemaan uusiin oloarvoihinsa.

Nopea vaste aiheuttaa ylitystä ja heilahteluja säädettävässä signaalissa, koska nopeista säätäjistä puuttuu riittävä takaisinkytkentä, joka hidastaa ja tasoittaa säätöä. Ilmiöstä voi johtaa analogian koko verkon käyttäytymiseen edellisten tulosten perusteella: Nopeat säätäjät toimivat lähes hyppäyksenomaisesti ja korjaavat tilannetta verkon heilahtelutaajuuteen nähden liian nopeasti, mikä aiheuttaa generaattoriryhmien joutumisen epätahtiin keskenään ja stabiilisuuden menettämisen.

Kun säätäjät poistetaan kokonaan, eli säädön nousuaika on teoriassa ääretön, verkon stabiilisuus menetetään kuitenkin nopeasti. Säätoajan hidastaminen ei siis paranna siirtokykyä loputtomasti. Näiden tulosten perusteella on pääteltävissä, että siirtokyvyn kannalta säätäjien nopeudelle on löydettävissä optimiarvo. Arvo on oletettavasti kääntäen verrannollinen verkon normaaliin heilahtelutaajuuteen 0,2 - 2 Hz, eli se on korkeintaan n. 5 s.

Verkon siirtokyvyn kannalta siis kaikkien koneiden muodostaman kokonaisuuden ekvivalenttista säätöaikaa pitäisi hidastaa. Hidastaminen voisi tapahtua lähinnä uusien, suuritehoisimmissa koneissa olevien nopeiden magnetointijärjestelmien virittämällä. Hitaita jännitteensäätäjiä ei voi muuttaa nopeammiksi. Kokonaisjärjestelmänä verkon säätö tarvitsisi jonkinlaisen suuren takaisinkytkennän itseensä, jotta siirtokyky paranisi.

8 YHTEENVETO

Työssä tutustutaan generaattorin ja sen magnetointijärjestelmien mallintamiseen matemaattisesti ja laskentaohjelmiston simuloinneissa. Magnetoinnin päätehtävän jännitteensäädön vaikutuksia vertaillaan säätötekniikan perusmenetelmin ja simuloimalla erilaisia magnetointijärjestelmiä siirtoverkon muutostilanteissa. Ensin tutkitaan jännitteensäädön merkitystä suuren tuotantoyksikön lähiviassa ja sen jälkeen kaikkien generaattoreiden säätäjien vaikutusta siirtoverkossa.

Nopealla nykyaikaisella staattisella magnetointilaitteistolla ja suurilla magnetointijännitteen rajoittimien arvoilla saavutetaan parempi stabiilisuus koneen lähiviassa, koska säädettävä signaali kulkee nopeasti säätösilmukan läpi ja nousemaan pääsevä magnetointijännite korjaa tilanteen. Staattisessa magnetoinnissa magnetointijännite riippuu useimmiten koneen liitinjännitteestä. Liitinjännitteen laskiessa vikatilanteessa magnetointijärjestelmä ei pysty koko vika-aikaa tuottamaan kattojännitettään ja säätöominaisuudet huonontuvat.

Koko verkon generaattoreiden hitaalla säädöllä ja pienillä rajoittimien arvoilla saavutetaan mitoittavassa vikatilanteessa parempi siirtokyky. Hitaammat säätäjät eivät häiriinny vian jälkeisestä verkon heilahtelusta. Nopeat säätäjät reagoivat heilahteluihin ja korjaavat tilannetta hyppäyksenomaisesti, mikä aiheuttaa heilahtelujen lisääntymistä ja stabiilisuuden menettämisen. Äärettömän hitaalla säädöllä, eli tilanteessa, jossa säätäjät poistetaan kokonaan, verkon stabiilisuus menetetään kuitenkin nopeasti. Kantaverkon siirtokyvyn kannalta on siis löydettävissä optimiarvo kaikkien säätäjien nopeudelle.

Askelvastekokeiden ja taajuusvasteanalyysin perusteella todetaan, että laskentaohjelmiston magnetointijärjestelmämallilla SCR_X pystytään hyvin mallintamaan kaikkia erilaisia magnetointitapoja Suomen kantaverkon tahtigeneraattoreissa. Mallilla on helppo säätää kaikkiin koneisiin haluttu liitinjännitteen nousuaika.

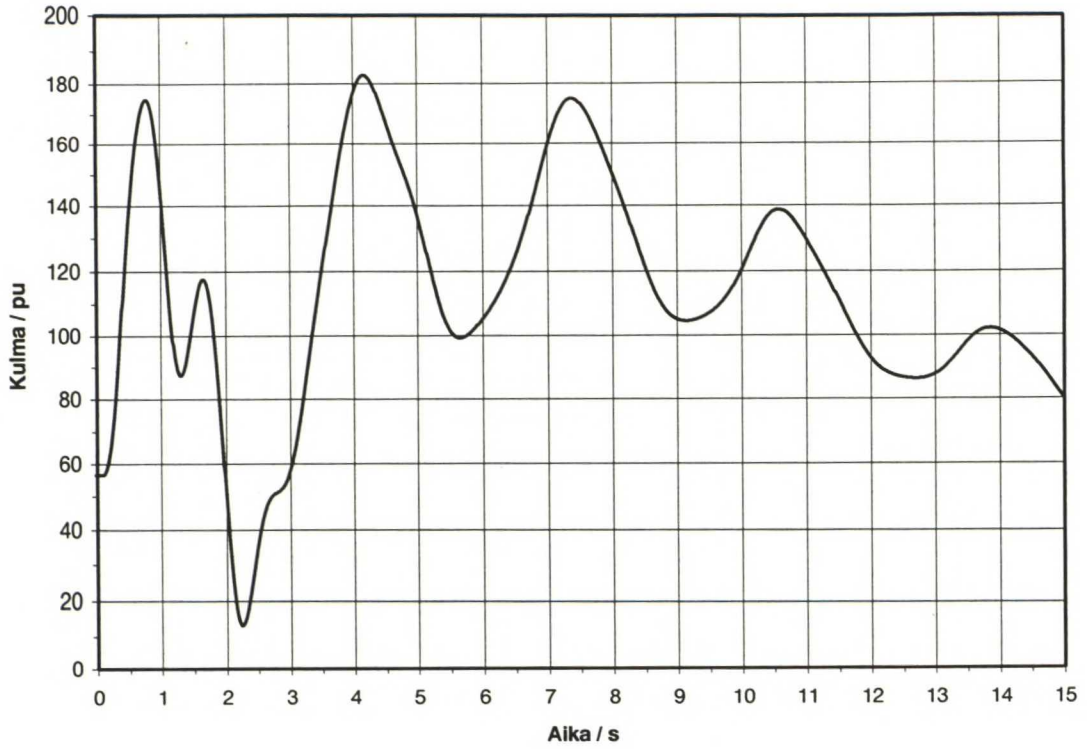
LÄHDEVIIITTEET

- /1/ CIGRE WG 14.05. Draft of June 30, 1995. Interaction between HVDC convertors and nearby generators. S. 19-22.
- /2/ Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. 2. p. Espoo, Otakustantamo. 487 s.
- /3/ IEC-draft. 1991. Rotating electrical machines- part 16: excitation systems for synchronous machines- chapter 3: dynamic performance. IEC/TC 2. 17 s.
- /4/ Ikonen, J. 1987. Rinnankäyvien vesivoimageneraattoreiden magnetointijärjestelmien tutkiminen - Diplomityö TKK. 90 s.
- /5/ IVS. 1993. Käytönvalvojan peruskoulutus, luentokirja, luku 5: Kantaverkon jännitetason säätö. 28s.
- /6/ IVS. 1996. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset. 7 s.
- /7/ Kostyniak, T. E. 1993. PSS/E -22 Power system simulator program application guide vol. II. Power Technologies, Inc.
- /8/ Kundur, P. 1994. Power System Stability and Control. Kalifornia, McGraw-Hill, Inc. 1176 s.
- /9/ Luomi, J. 1982. Sähkökoneiden muutosilmiöt. Espoo, Otakustantamo. 206 s.
- /10/ Mörsky, J. & J. 1994. Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka. Espoo, Otatieto Oy. 300 s.
- /11/ Nordel. Nätdimensioneringsregler för nordiska överföringssystemet, slutrapport Augusti 1992, appendix A. 11s.
- /12/ Pyökäri, T. 1971. Sähkökoneoppi. Espoo, Weilin+Göös. 485 s.

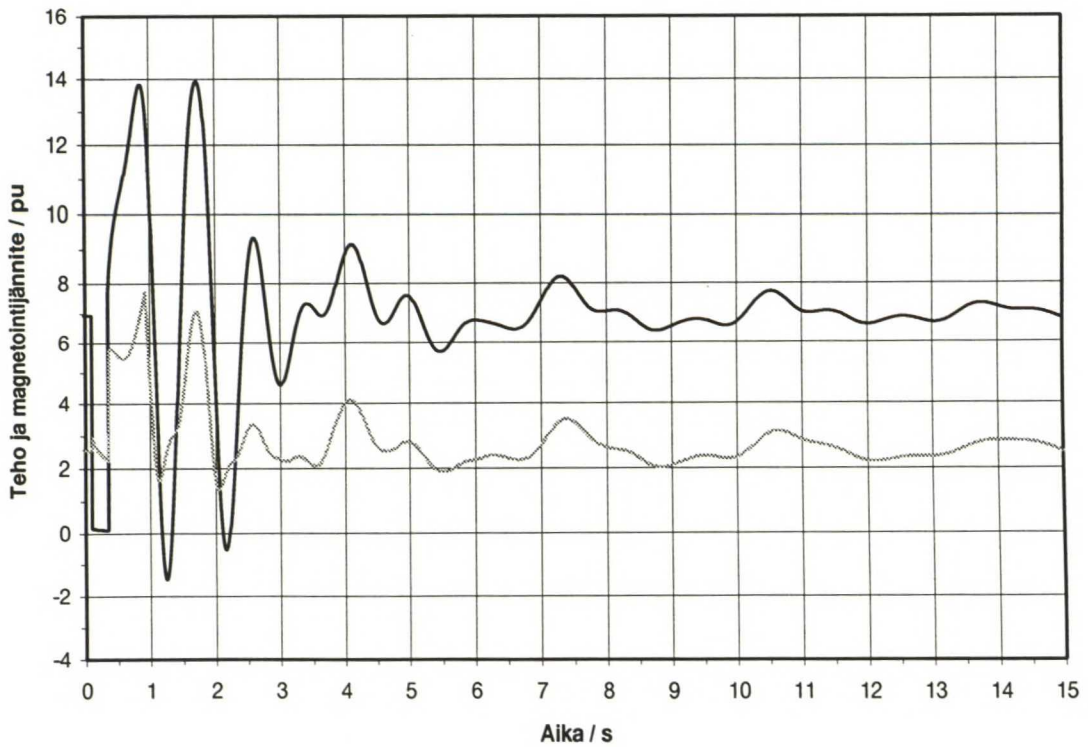
TKK SÄHKÖTEKNIKA,
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

LIITTEET

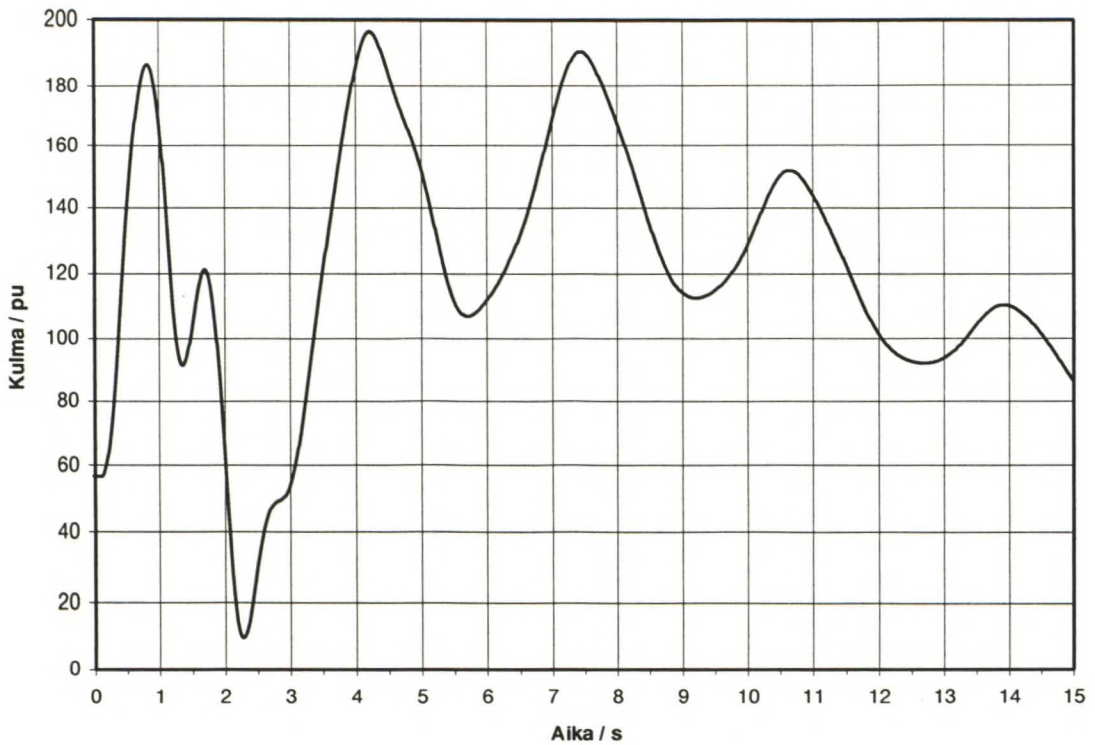
- Liite 1: Säätäjän nopeuden ja rajoittimien vaikutus koneen lähiviassa.
- Liite 2: Säätäjien nopeuden vaikutus siirtokykyyn Petäjäskosken kiskoviassa.
- Liite 3: Säätäjien nopeuden vaikutus siirtokykyyn Pikkaralan kiskoviassa.



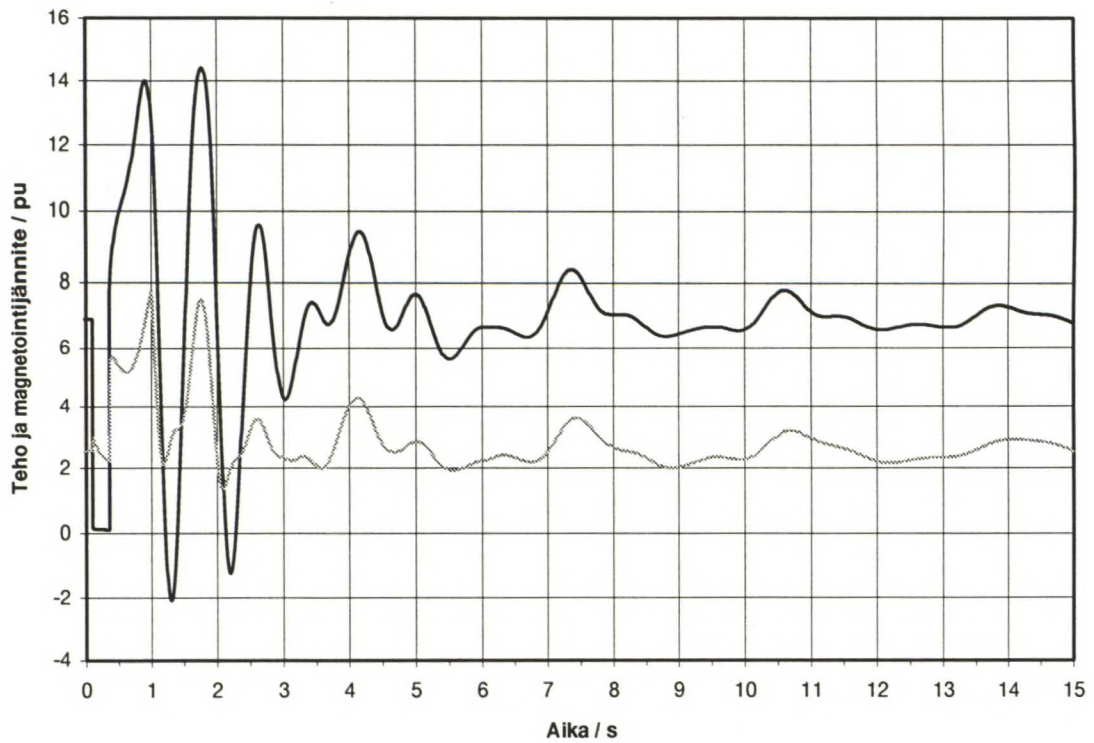
Olkiluodon generaattorin napakulma 250 ms lähiviassa 0,3 s säätäjällä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 8$ ja $U_{\text{MIN}} = 0$.



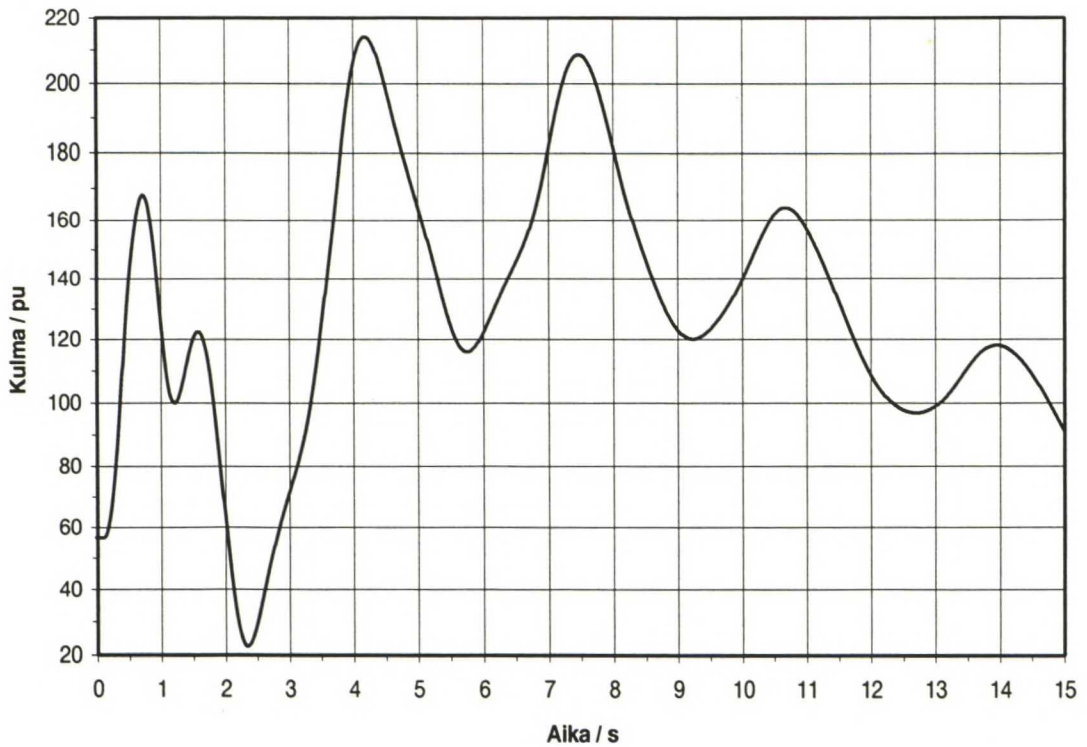
Olkiluodon generaattorin teho (musta viiva) ja magnetointijännite (harmaa viiva) 250 ms lähiviassa 0,3 s säätäjällä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 8$ ja $U_{\text{MIN}} = 0$.



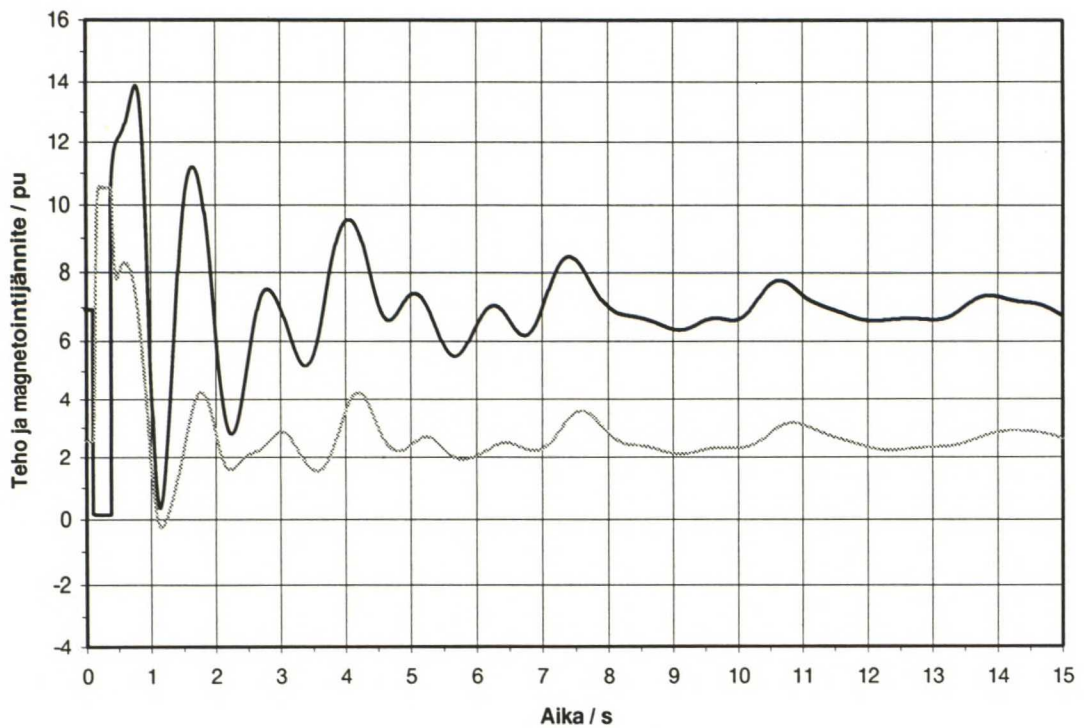
Olkiluodon generaattorin napakulma 260 ms lähiviassa 0,3 s säätäjällä, jossa lisästabilointi. Rajoittimet $U_{MAX} = 8$ ja $U_{MIN} = 0$.



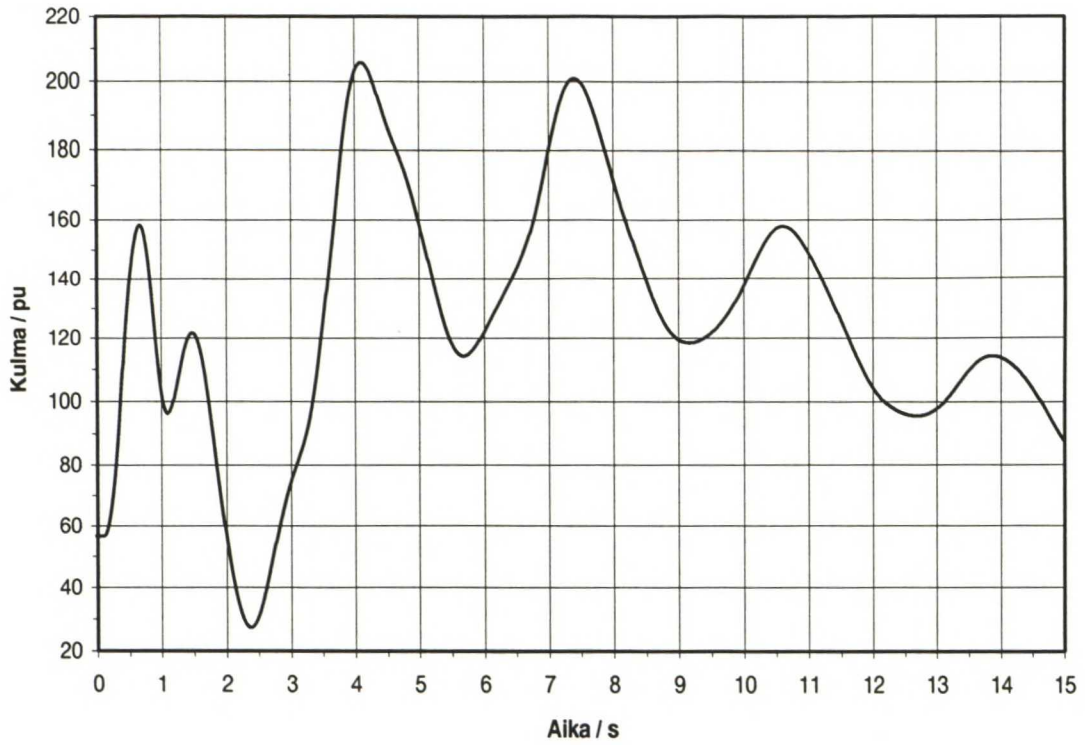
Olkiluodon generaattorin teho (musta viiva) ja magnetointijännite (harmaa viiva) 260 ms lähiviassa 0,3 s säätäjällä, jossa lisästabilointi. Rajoittimet $U_{MAX} = 8$ ja $U_{MIN} = 0$.



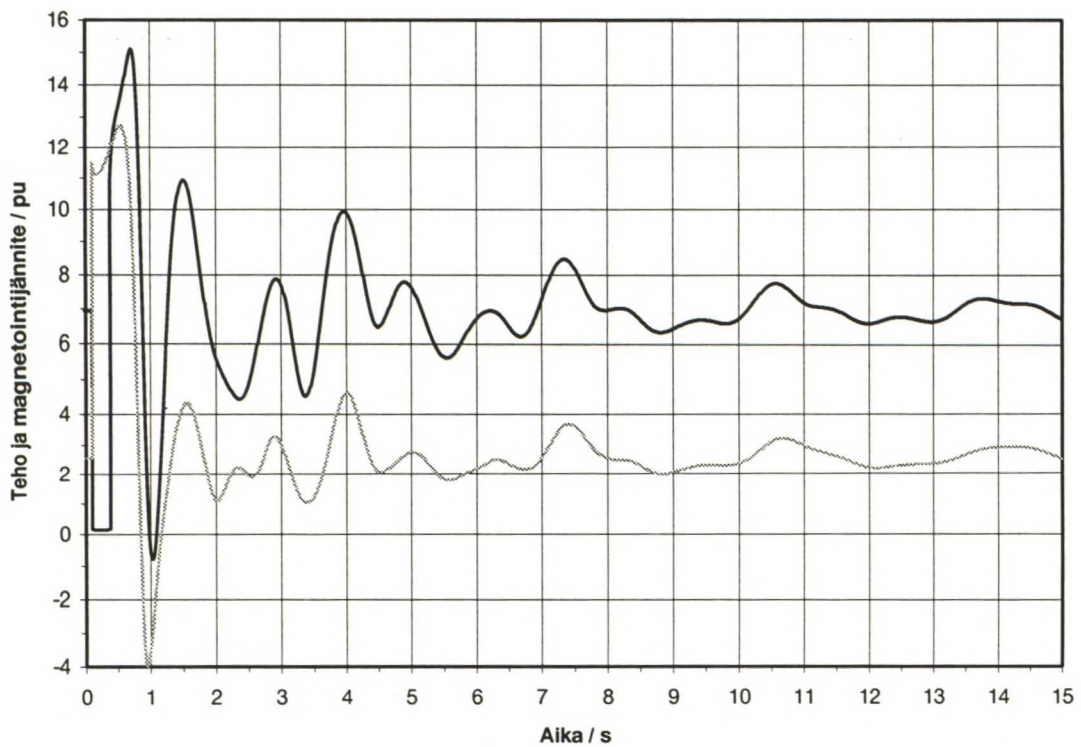
Olkiluodon generaattorin napakulma 280 ms lähiviassa alkuperäisellä säätäjällä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 55$ ja $U_{\text{MIN}} = -42$.



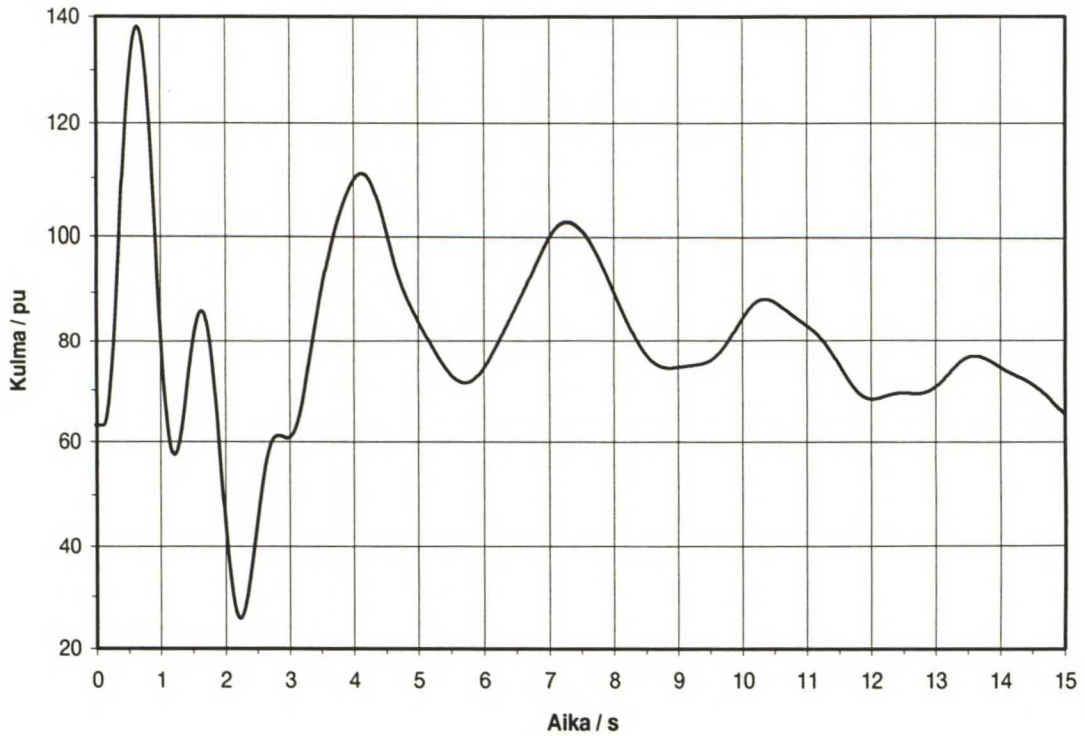
Olkiluodon generaattorin teho (musta viiva) ja magnetointijännite (harmaa viiva) 280 ms lähiviassa alkuperäisellä säätäjällä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 55$ ja $U_{\text{MIN}} = -42$.



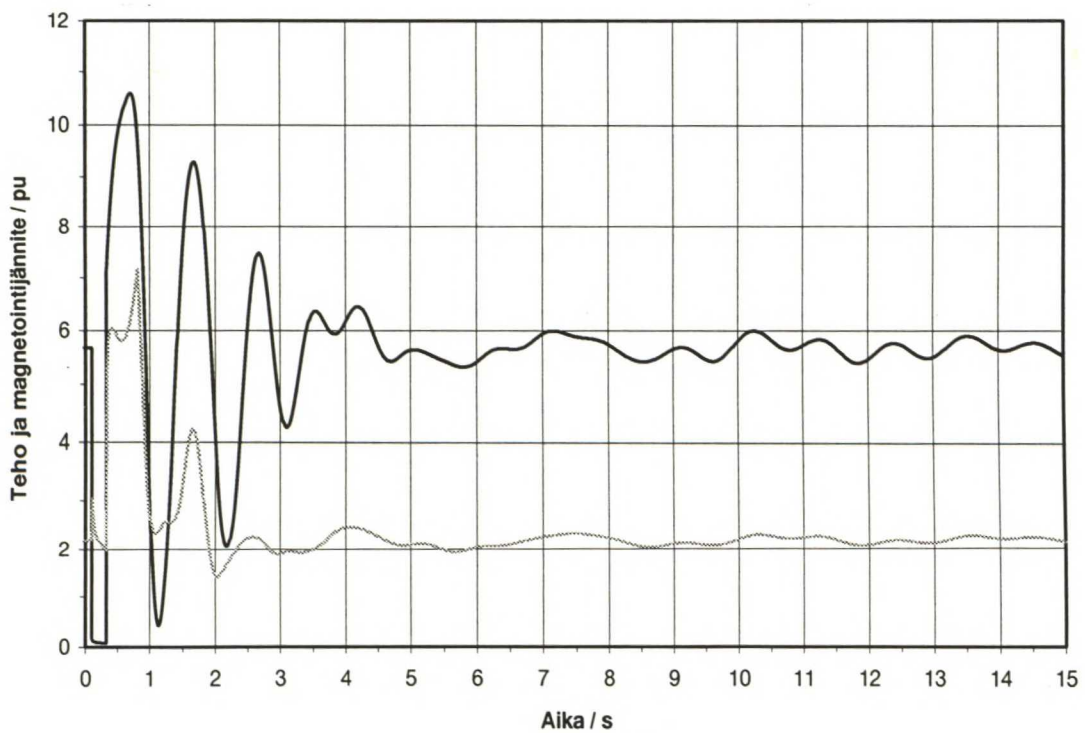
Olkiluodon generaattorin napakulma 280 ms lähiviassa 0,3 s säätäjällä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 55$ ja $U_{\text{MIN}} = -42$.



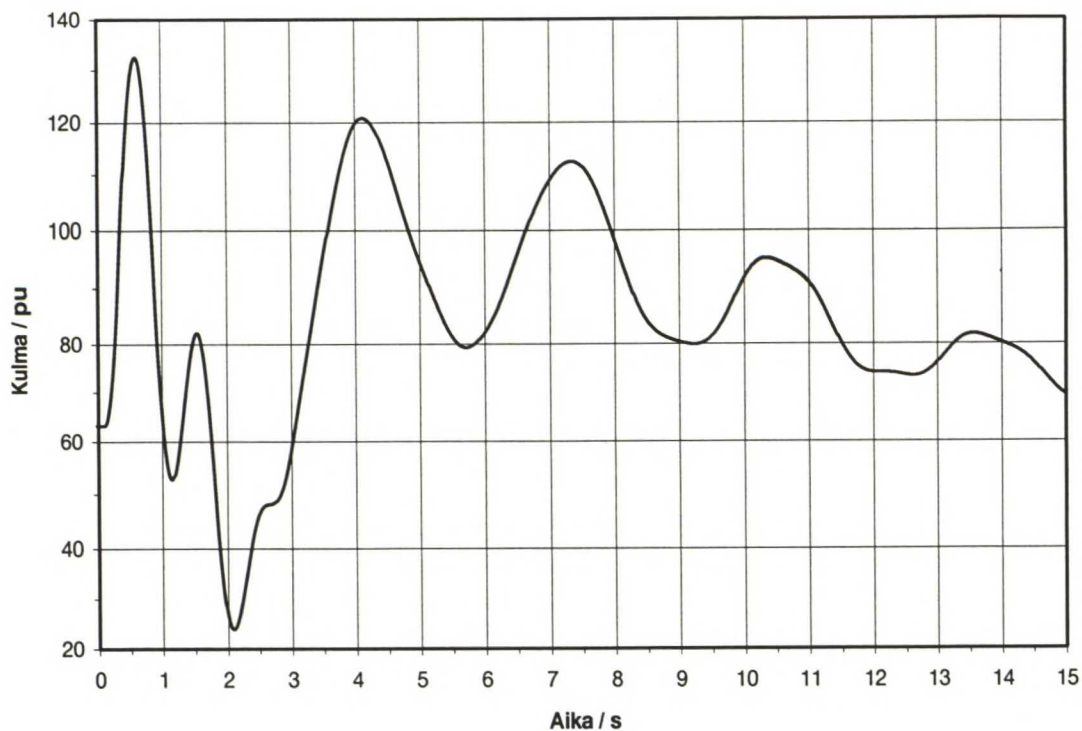
Olkiluodon generaattorin teho (musta viiva) ja magnetointijännite (harmaa viiva) 280 ms lähiviassa 0,3 s säätäjällä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 55$ ja $U_{\text{MIN}} = -42$.



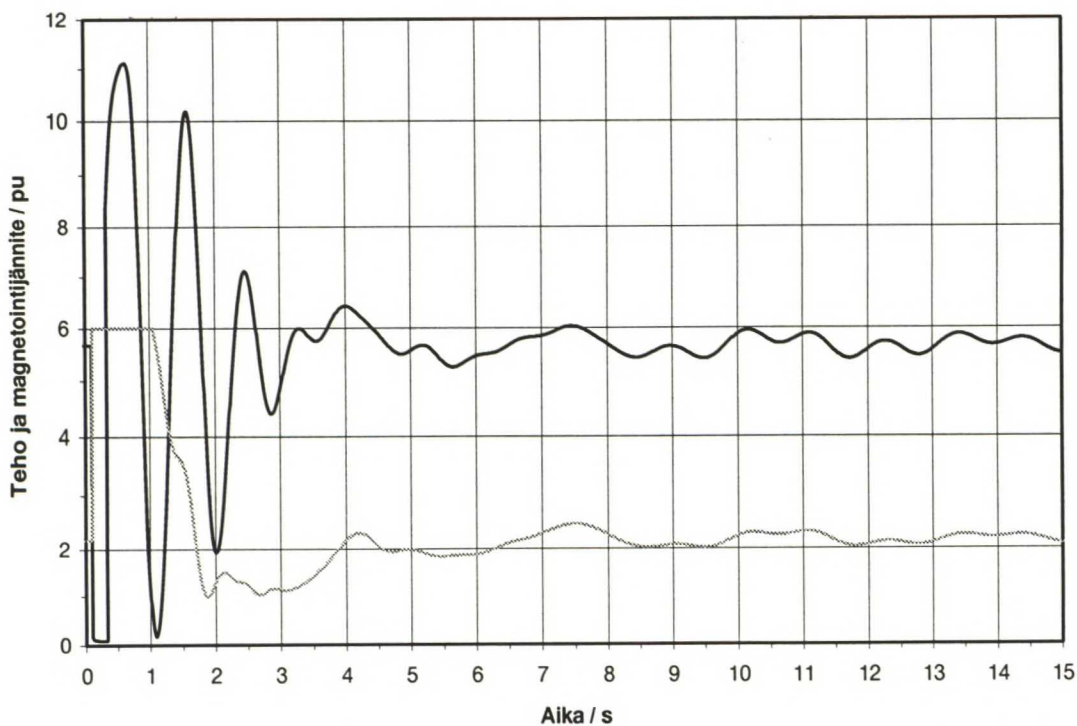
Meri-Porin generaattorin napakulma 220 ms lähiviassa 0,3 s säätäjällä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 8$ ja $U_{\text{MIN}} = 0$.



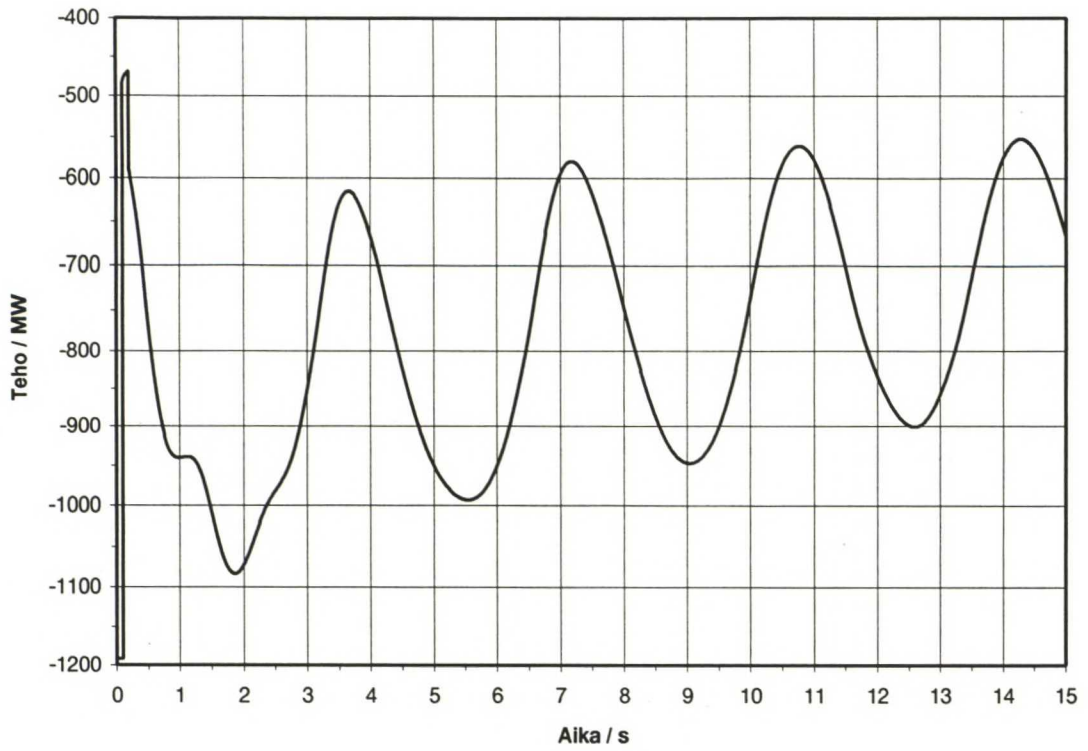
Meri-Porin generaattorin teho (musta viiva) ja magnetointijännite (harmaa viiva) 220 ms lähiviassa 0,3 s säätäjällä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 8$ ja $U_{\text{MIN}} = 0$.



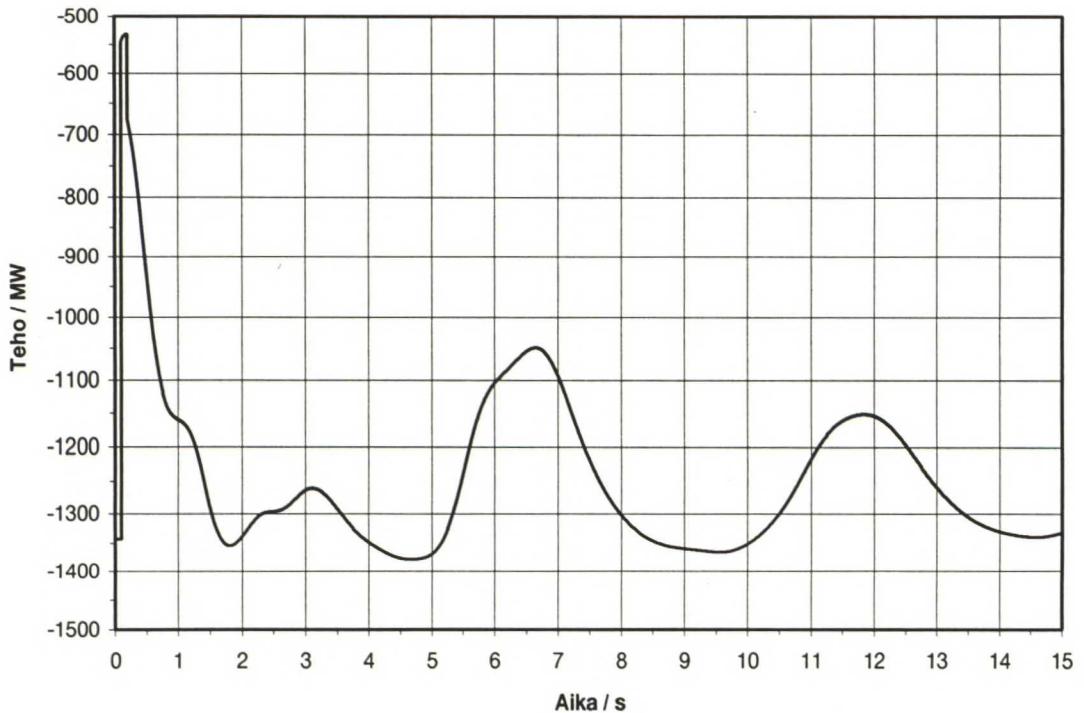
Meri-Porin generaattorin napakulma 230 ms lähiviassa alkuperäisellä säätäjällä, rajoittimet $U_{MAX} = 6$ ja $U_{MIN} = -5,865$.



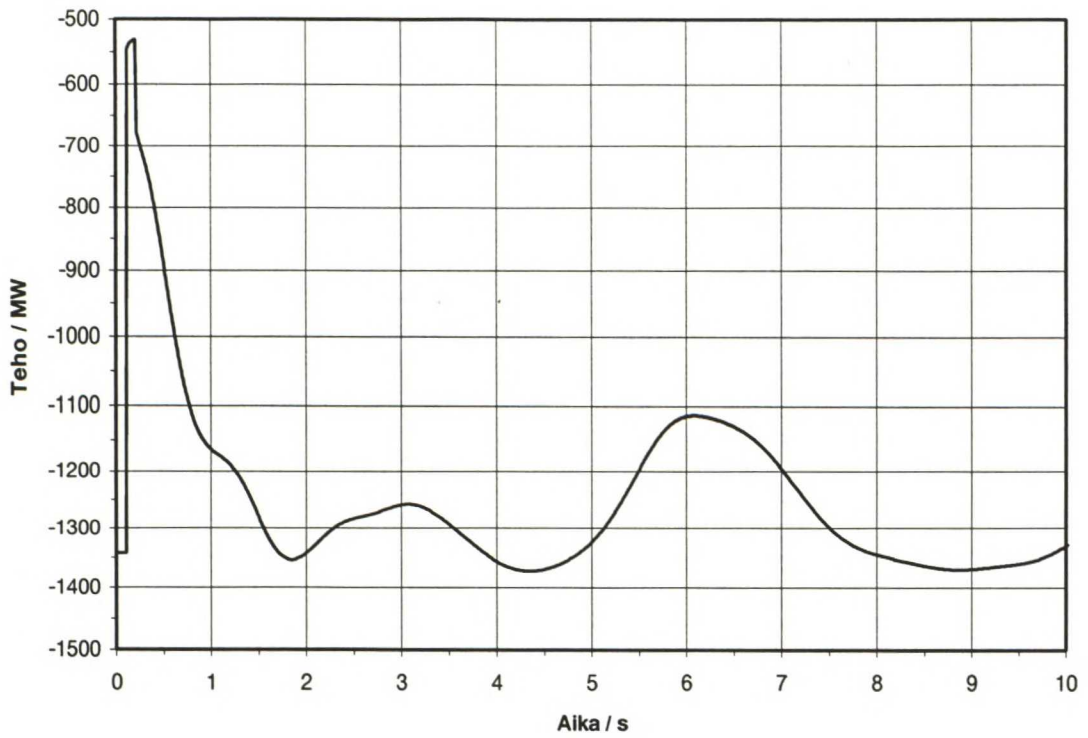
Meri-Porin generaattorin teho (musta viiva) ja magnetointijännite (harmaa viiva) 230 ms lähiviassa alkuperäisellä säätäjällä, rajoittimet $U_{MAX} = 6$ ja $U_{MIN} = -5,865$.



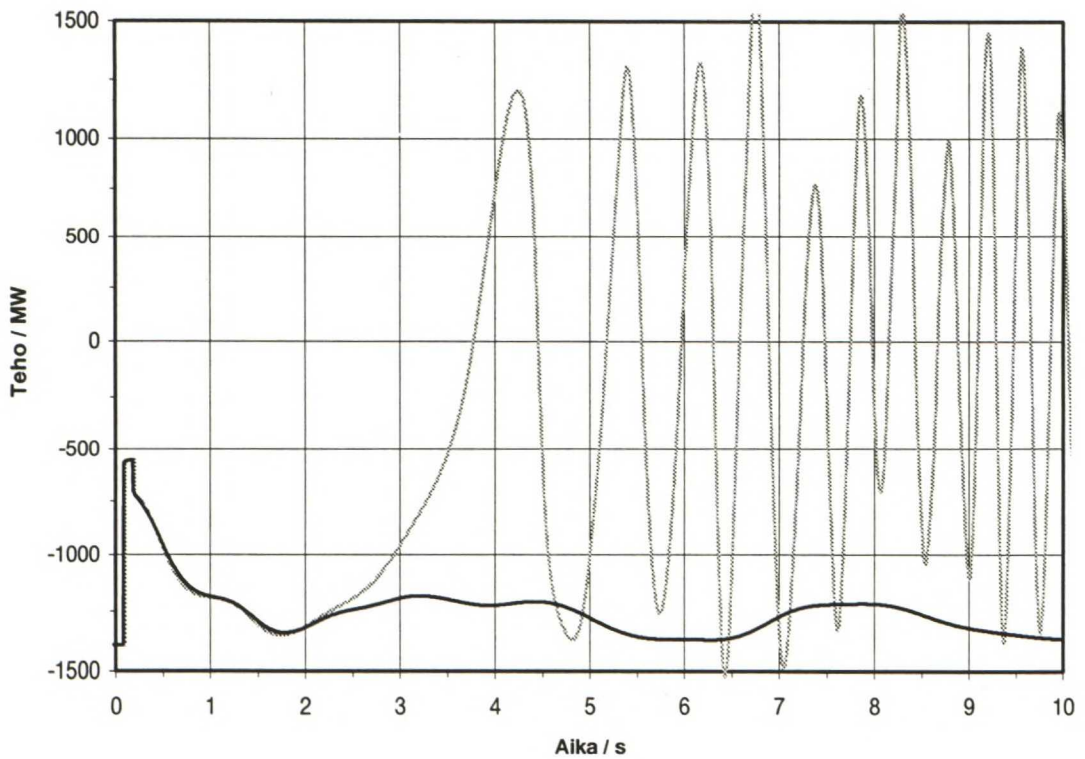
Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen teho Petäjäskosken kiskoviassa 1200 MW siirrossa ilman jännitteensäätäjiä.



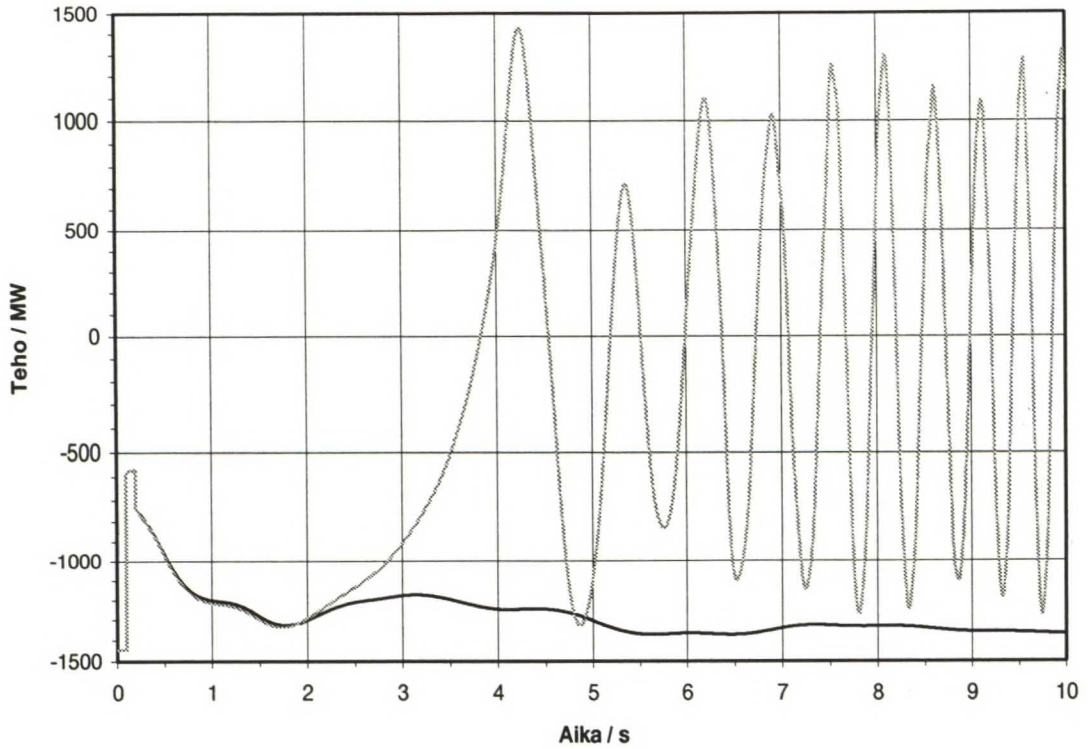
Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen teho Petäjäskosken kiskoviassa 1350 MW siirrossa alkuperäisillä jännitteensäätäjillä.



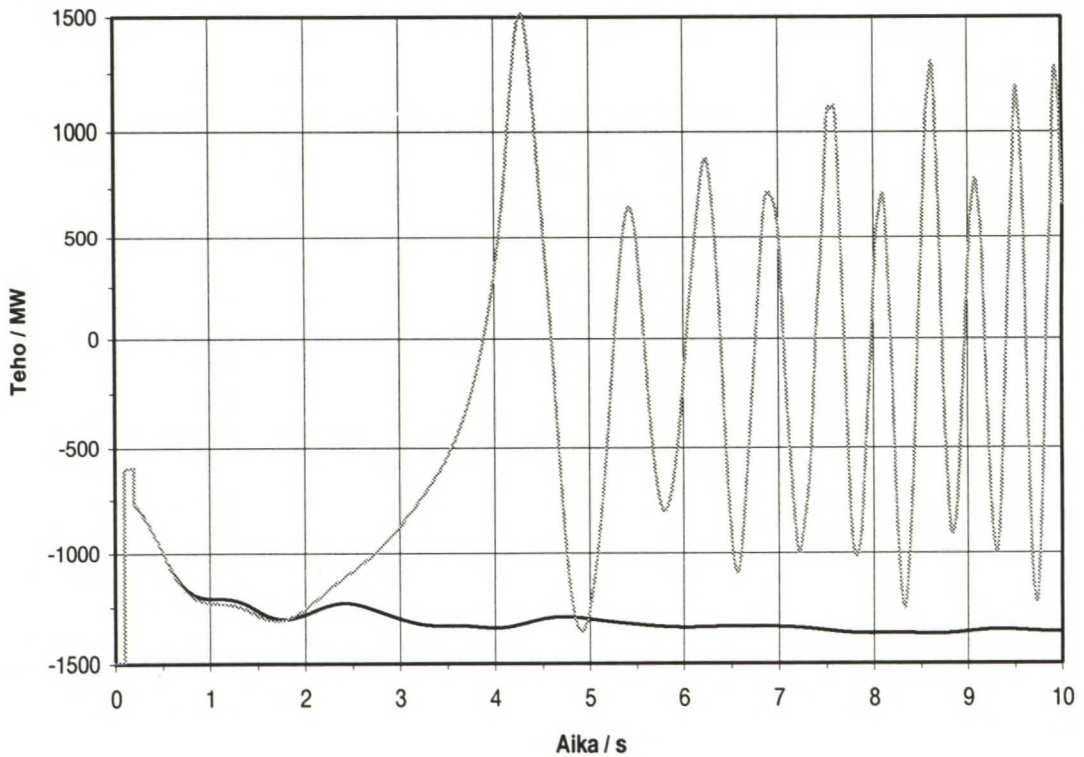
Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen teho Petäjäsken kiskoviassa 1350 MW siirrossa 0,3 s säätäjillä, rajoittimet $U_{\text{MAX}} = 2,85$ ja $U_{\text{MIN}} = 0$.



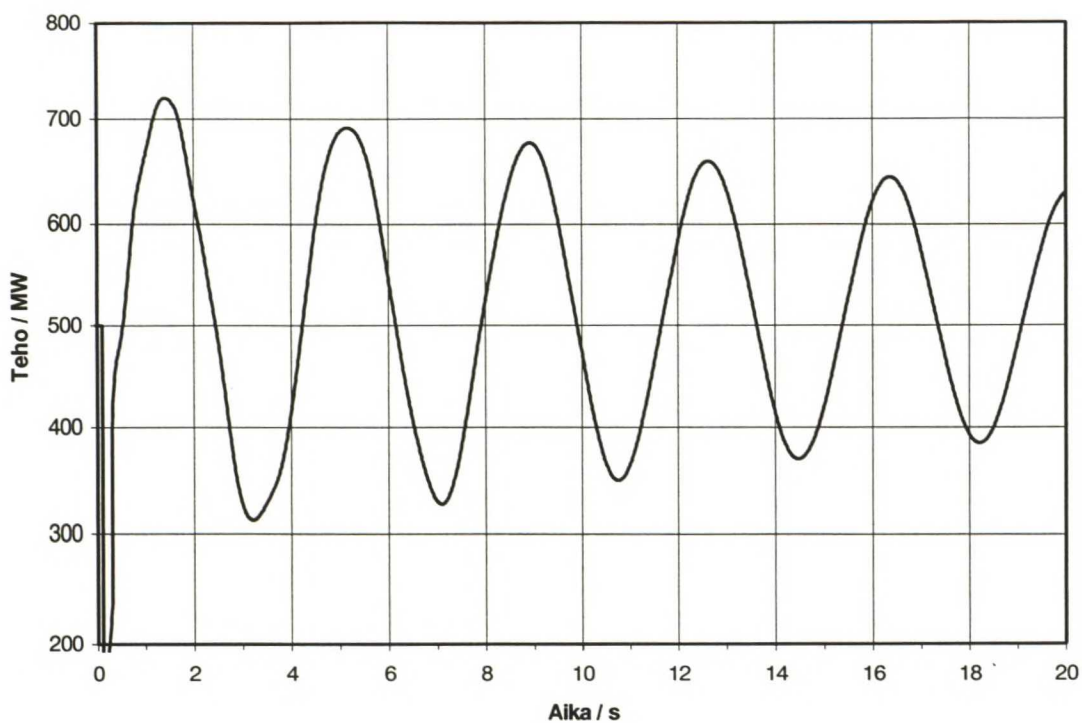
Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen teho Petäjäsken kiskoviassa 1400 MW siirrossa. Musta viiva = 0,5 s säätäjät rajoittimilla $U_{\text{MAX}} = 2,85$ ja $U_{\text{MIN}} = 0$ ja harmaa viiva = alkuperäiset säätäjät.



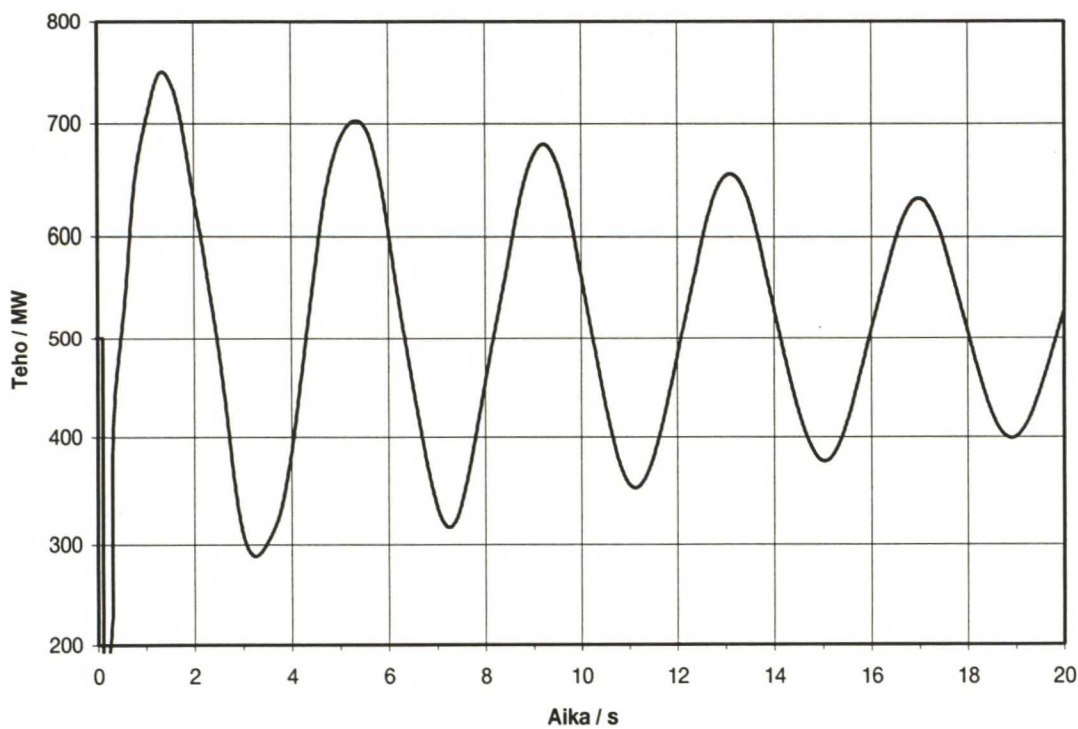
Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen teho Petäjäskosken kiskoviassa 1450 MW siirrossa. Musta viiva = 0,8 s säätäjät ja harmaa viiva = 0,5 s säätäjät rajoittimilla $U_{MAX} = 2,85$ ja $U_{MIN} = 0$.



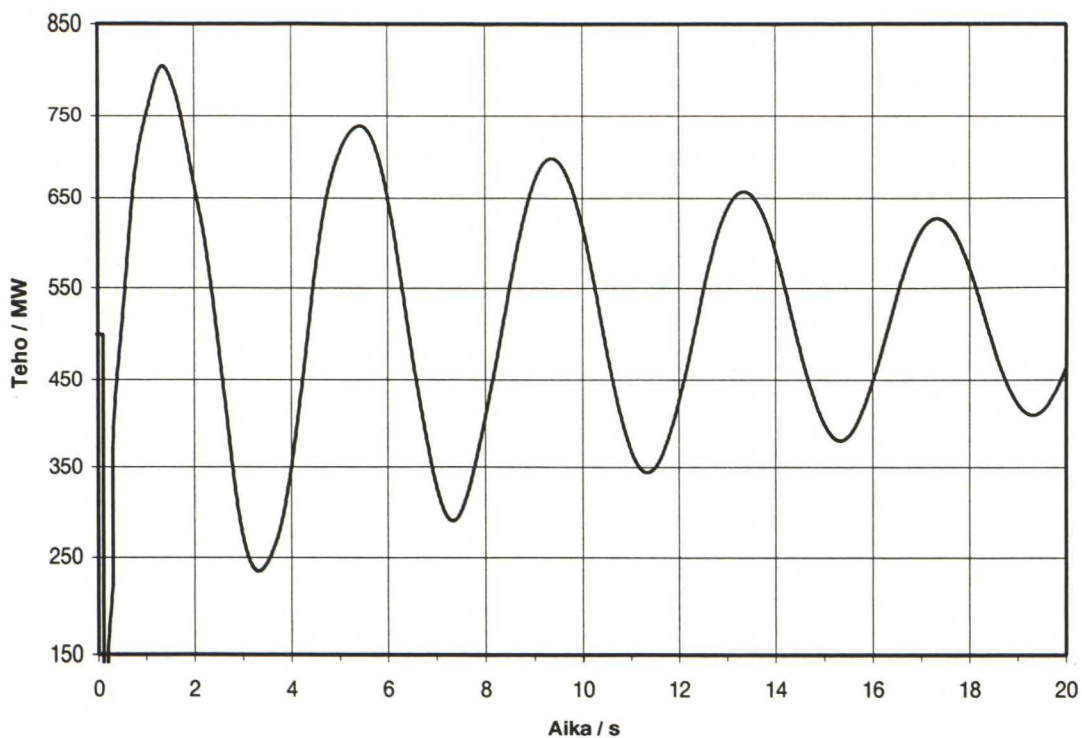
Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen teho Petäjäskosken kiskoviassa 1500 MW siirrossa. Musta viiva = 1,6 s säätäjät ja harmaa viiva = 0,8 s säätäjät rajoittimilla $U_{MAX} = 2,85$ ja $U_{MIN} = 0$.



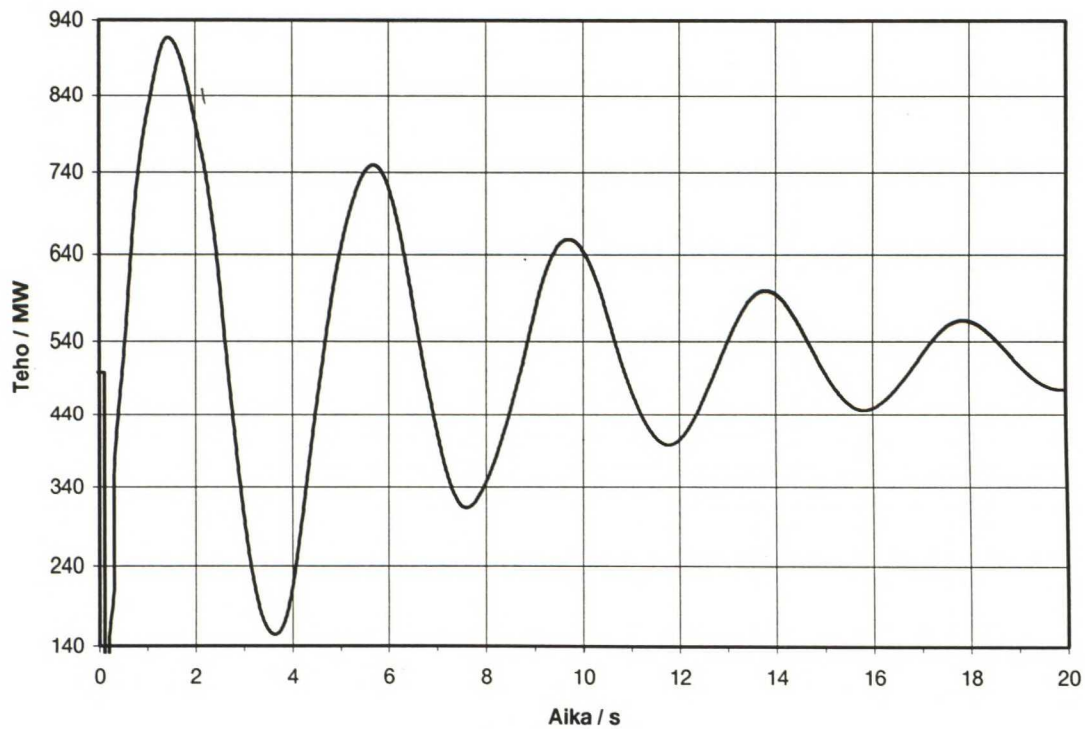
Pikkaralan kiskovian jälkeinen Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen siirtotehojen vaimennus 0,3 s säätäjillä.



Pikkaralan kiskovian jälkeinen Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen siirtotehojen vaimennus 0,5 s säätäjillä.



Pikkaralan kiskovian jälkeinen Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen siirtotehojen vaimennus 0,8 s säätäjillä.



Pikkaralan kiskovian jälkeinen Suomen ja Ruotsin välisten AC-yhdysjohtojen siirtotehojen vaimennus 1,6 s säätäjillä.